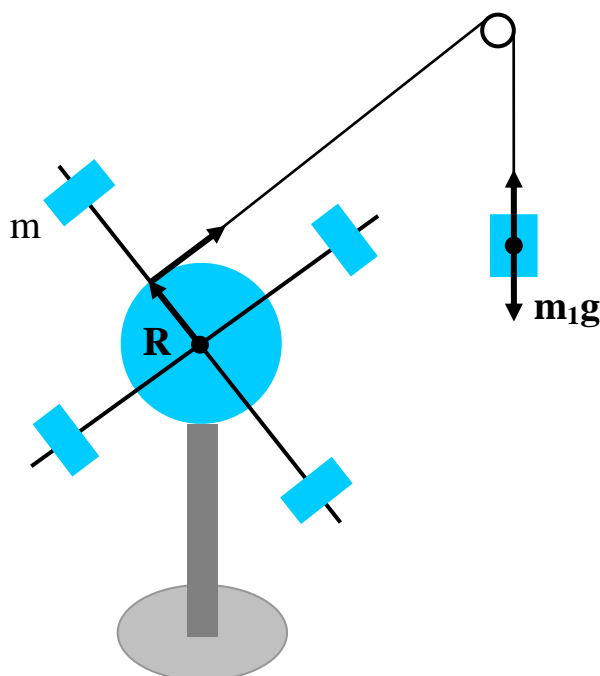


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В. Н. КАРАЗІНА

Савченко О. М.

ФІЗИКА. ПРАКТИКУМ

**Методичні вказівки
для студентів природничих факультетів**



ХАРКІВ 2013

УДК 53

ББК 22.3

Рецензенти: кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри експериментальної фізики фізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Шеховцов О. В.; кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри загальної фізики фізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Таранова І. А.

Затверджено Науково-методичною радою Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

Савченко О. М. Фізика. Практикум: Методичні вказівки для студентів природничих факультетів. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2013. – 77 с.

Посібник містить теоретичний матеріал, опис 15 лабораторних робіт з усіх розділів курсу загальної фізики, питання для модульного контролю, а також необхідні довідкові матеріали. Посібник розроблений відповідно до програми підготовки бакалаврів природничих спеціальностей університетів і призначений для студентів біологічного, геолого-географічного та екологічного факультетів.

ЗМІСТ

ПАМ'ЯТКА ДЛЯ СТУДЕНТІВ.....	4
<i>Лабораторна робота № 1.</i>	
Динаміка поступального й обертального руху. Визначення моменту інерції.....	5
<i>Лабораторна робота №2.</i>	
Пружні властивості тіл. Визначення модуля Юнга.....	10

<i>Лабораторна робота №3.</i>	
Коливання.....	16
<i>Лабораторна робота № 4.</i>	
Визначення універсальної газової сталої.....	22
<i>Лабораторна робота № 5.</i>	
Визначення коефіцієнта в'язкості рідини методом Стокса.....	24
<i>Лабораторна робота №6.</i>	
Поверхневий натяг	27
<i>Лабораторна робота №7.</i>	
Розширення границь вимірів амперметра та вольтметра	33
<i>Лабораторна робота № 8.</i>	
Вивчення роботи електронного осцилографа.	
Визначення амплітуди та частоти змінного сигналу.....	37
<i>Лабораторна робота № 9.</i>	
Визначення заряду електрона методом електролізу	42
<i>Лабораторна робота №10.</i>	
Вивчення магнітного поля соленоїда та визначення магнітної сталої.....	45
<i>Лабораторна робота №11.</i>	
Визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі.....	52
<i>Лабораторна робота № 12.</i>	
Дослідження інтерференції світла при спостереженні кілець Ньютона	56
<i>Лабораторна робота № 13.</i>	
Дифракція. Визначення довжини хвилі випромінювання лазера.....	60
<i>Лабораторна робота №14.</i>	
Визначення сталої Стефана-Больцмана	63
<i>Лабораторна робота №15.</i>	
Визначення довжин хвиль спектральних ліній. Якісний спектральний аналіз.....	67
Література.....	70
Додатки.....	71

ПАМ'ЯТКА ДЛЯ СТУДЕНТІВ

Лабораторний практикум є невід'ємною частиною курсу загальної фізики. За час його виконання студент отримує певну кількість балів, яка враховується при виставленні кінцевої семестрової оцінки. Ця кількість балів і кількість лабораторних робіт

у семестрі встановлюється лектором і зафіксована в затвердженій програмі курсу загальної фізики. Всі пропущені заняття мають бути відпрацьовані. Якщо лабораторний практикум не виконаний повністю, студент не допускається до підсумкового семестрового контролю (іспиту або заліку).

Виконання кожної роботи складається з наступних обов'язкових етапів: написання домашнього конспекту, складання допуску перед початком роботи, виконання необхідних вимірів на лабораторному устаткуванні, оформлення роботи та захисту.

На початку заняття студент показує викладачеві зошит з конспектом лабораторної роботи, зробленим удома. Конспект повинен містити назву роботи, мету роботи, необхідні теоретичні відомості, розрахункову формулу, хід виконання роботи (загалом 2-4 сторінки). За цим конспектом студент відповідає на запитання викладача, з'ясовує подробиці роботи на лабораторному устаткуванні – складає допуск до виконання роботи. Після цього під керівництвом інженера-лаборанта студент виконує необхідні виміри. Перед кінцем заняття студент обов'язково повинен пред'явити викладачеві зошит із отриманими даними вимірів, розрахунками, графіками, кінцевим результатом. У разі необхідності відповідні розрахунки, оцінки похибок студент закінчує вдома і показує заключне оформлення роботи (звіт) перед початком наступного заняття. Зошит з усіма оформленими роботами обов'язково зберігається до кінця семестру для підрахунку загальної кількості балів. Викладач має право попросити зошит на будь-якому занятті.

Під час практикуму певна кількість часу (занять) відводиться для захисту лабораторних робіт. На цих заняттях студенти відповідають на контрольні запитання, наведені в кінці опису кожної роботи, за що отримують додаткові бали. Більш складні запитання позначені зірочками. За бажанням студента відповісти на контрольні запитання можна протягом будь-якого заняття, якщо після виконання передбаченої роботи залишається час.

ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

МЕХАНІКА

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДИНАМІКА ПОСТУПАЛЬНОГО Й ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ. ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ

Основні величини, що характеризують рух тіла:

- *радіус-вектор* \vec{r} визначає положення тіла в просторі в будь-який момент часу;
- *швидкість* \vec{v} показує, як швидко змінюється положення тіла. Швидкість дорівнює першій похідній радіус-вектора за часом

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt};$$

- *прискорення* \vec{a} характеризує зміну швидкості (зростання або зменшення). Прискорення дорівнює першій похідній швидкості за часом (другій похідній радіус-вектора)

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \right) = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}. \quad (1.1)$$

При *поступальному русі* всі точки тіла рухаються однаково, тобто в будь-який момент часу швидкості та прискорення всіх точок рівні.

Обертальний рух – це рух, при якому всі точки тіла рухаються по колах, центри яких лежать на одній прямій – осі обертання. При такому русі різні точки тіла за однаковий час проходять різні шляхи (це означає, що їхні швидкості та прискорення різні), але обертаються на однакові кути φ . Тому для опису обертання вводять кутові характеристики:

– *кутове переміщення* $\vec{\varphi}$;

– *кутова швидкість* $\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$; (1.2)

– *кутове прискорення* $\vec{\beta} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \frac{d^2\vec{\varphi}}{dt^2}$. (1.3)

Вектори $\vec{\varphi}$, $\vec{\omega}$ і $\vec{\beta}$ аксіальні та спрямовані уздовж осі обертання.

Кінематичне рівняння рівноприскореного руху (рівняння, що зв'язує основні характеристики руху тіла) для поступального й обертального руху записується аналогічно:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a} t^2}{2} ; \quad (1.4)$$

$$\vec{\varphi} = \vec{\varphi}_0 + \vec{\omega}_0 t + \frac{\vec{\beta} t^2}{2} . \quad (1.5)$$

Знаючи рівняння руху та початкові умови (координати та швидкість у початковий момент часу), можна визначити положення та швидкість тіла в будь-який момент часу – це основна задача механіки.

Якщо тіло рухається під дією сил, то виникає питання про зв'язок сили та прискорення тіла. Відповідь на нього дає *другий закон Ньютона – динамічне рівняння руху*:

$$\vec{F} = m\vec{a} , \quad (1.6)$$

де \vec{F} – сумарна сила, що діє на тіло;

m – маса тіла.

Якщо під дією сил тіло обертається, то динамічне рівняння руху виглядає таким чином

$$\vec{M} = I\vec{\beta} , \quad (1.7)$$

де \vec{M} – сумарний момент сил $\vec{M} = [\vec{r}\vec{F}]$;

\vec{r} – радіус-вектор точки прикладання сили;

I – момент інерції, що характеризує інертність тіла при обертальному русі.

Якщо уявити тіло як сукупність малих об'ємів ΔV , кожний з яких вважати матеріальною точкою масою Δm_i , то *момент інерції однієї матеріальної точки*, що обертається навколо осі, за визначенням дорівнює:

$$\Delta I_i = \Delta m_i r_i^2 , \quad (1.8)$$

де r_i – відстань від даної точки до осі обертання.

Момент інерції усього тіла, що обертається, дорівнює сумі моментів інерції точок, з яких воно складається:

$$I = \sum_i \Delta I_i = \sum_i \Delta m_i r_i^2 . \quad (1.9)$$

Момент інерції тіла залежить від положення осі обертання.

Мета роботи – визначити момент інерції I маятника Обербека.

Опис установки. Маятник Обербека являє собою систему двох схрещених стрижнів, на яких закріплені чотири вантажі m . Система стрижнів з вантажами приводиться в обертання ниткою, до іншого кінця якої прикріплений падаючий вантаж m_1 (рис. 1.1).

На вантаж m_1 діють дві сили: сила ваги $m_1 \vec{g}$ і сила натягу нитки \vec{T} . Вантаж рухається поступально. Динамічне рівняння руху цього вантажу випливає з (1.6) і має вигляд:

$$m_1 \vec{g} + \vec{T} = m_1 \vec{a} . \quad (1.10)$$

Сили спрямовані в протилежні боки, тому можна написати:

$$m_1 g - T = m_1 a . \quad (1.11)$$

Кінематичне рівняння руху вантажу m_1 на основі (1.4) набуває вигляду:

$$h = \frac{at^2}{2} , \quad (1.12)$$

приймаючи, що в початковий момент $v_0 = 0$, $r_0 = 0$, $r = h$.

Систему стрижнів з вантажами приводить в обертання сила натягу T .

Момент сили дорівнює:

$$\vec{M} = [\vec{R}\vec{T}] , \quad (1.13)$$

де R – радіус шківів, на який намотана нитка (рис. 1.1).

Оскільки $\vec{R} \perp \vec{T}$, модуль моменту сили натягу дорівнює:

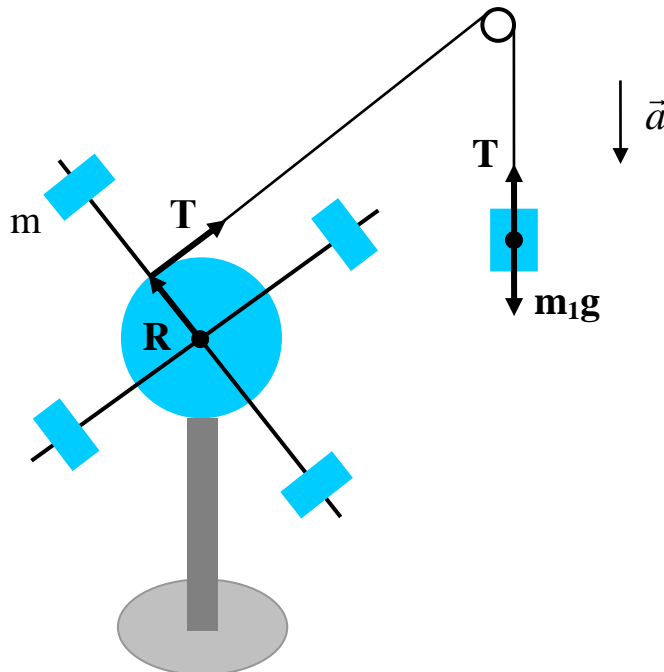


Рис. 1.1

$$M = RT \sin \alpha = RT . \quad (1.14)$$

Динамічне рівняння руху обертальної системи на підставі (1.7) має вигляд:

$$RT = I\beta, \quad (1.15)$$

де I – момент інерції системи.

Кутове прискорення $\vec{\beta}$ обертальної системи та прискорення вантажу \vec{a} зв'язані співвідношенням

$$\beta = a/R. \quad (1.16)$$

Таким чином, для знаходження величини, що визначається – моменту інерції I – маємо систему рівнянь

$$\begin{cases} m_1 g - T = m_1 a \\ RT = I\beta \\ \beta = a/R \\ a = \frac{2h}{t^2} \end{cases}. \quad (1.17)$$

Вирішуючи її, знайдемо момент інерції I :

$$I = \frac{RT}{\beta} = \frac{RT}{a} R = \frac{R^2 t^2}{2h} T. \quad (1.18)$$

$$T = m_1 (g - a) = m_1 \left(g - \frac{2h}{t^2} \right).$$

Тоді

$$I = \frac{R^2 t^2 m_1}{2h} \left(g - \frac{2h}{t^2} \right). \quad (1.19)$$

Остаточно

$$I = \frac{m_1 R^2 (gt^2 - 2h)}{2h}. \quad (1.20)$$

Тобто момент інерції визначається через параметри руху вантажу m_1 , що падає: висоту його падіння h і час падіння t .

З іншого боку, момент інерції системи дорівнює сумі моментів інерції стрижнів і вантажів

$$I = 2I_{cm} + 4I_b = 2 \frac{m_0 l^2}{12} + 4mx^2, \quad (1.21)$$

де l – довжина стрижня; m_0 – маса стрижня;

x – відстань від середини вантажу m до осі обертання.

Розрахунок моменту інерції одного стрижня наведений у доповненні.

Виконання роботи

1. Для декількох відстаней x від вантажів m до осі обертання розрахувати момент інерції I за формулою (1.21). Побудувати графік залежності $I(x)$.

Увага: всі величини до початку розрахунку перевести в систему СІ.

2. Закріпивши вантажі на стрижнях на заданій відстані x , намотують нитку на шків. При цьому вантаж m_1 піднімається на деяку висоту h . Вимірюють її.
3. Відпускають вантаж m_1 і вимірюють час його падіння t . Дослід повторюють п'ять разів. Визначають середній час і за формулою (1.20) розраховують момент інерції.
4. Порівняти значення I , розраховані за формулами (1.21) і (1.20).

ДОПОВНЕННЯ

Знайдемо момент інерції одного стрижня, який обертається навколо осі OO' , що проходить через його середину.

Розіб'ємо стрижень на малі об'єми ΔV (виділений на рис.1.2). Маса кожного з них дорівнює

$$\Delta m_i = \rho \Delta V_i, \quad (1.22)$$

де ρ – густина матеріалу стрижня.

$$\Delta V_i = S \Delta r_i \rightarrow \Delta m_i = \rho S \Delta r_i. \quad (1.23)$$

Тоді
$$\Delta I_i = \Delta m_i r_i^2 = \rho S \Delta r_i r_i^2. \quad (1.24)$$

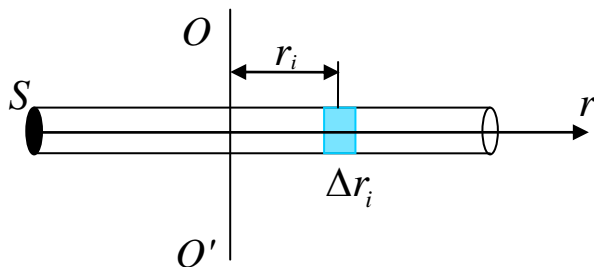


Рис. 1.2

Момент інерції усього стрижня дорівнює сумі моментів інерції усіх таких об'ємів. Якщо число n об'ємів нескінченно велике, то додавання замінюється інтегруванням:

$$I = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_i^n \Delta I_i = 2 \int_0^{l/2} \rho S r^2 dr = 2 \rho S \int_0^{l/2} r^2 dr =$$

$$= 2 \rho S \frac{r^3}{3} \Big|_0^{l/2} = \frac{2 \rho S}{3} r^3 \Big|_0^{l/2} = \frac{2 \rho S l^3}{3 \cdot 8} = \frac{\rho S l^3}{12} . \quad (1.25)$$

З огляду на те, що маса всього стрижня $m = \rho V = \rho S l$, остаточно маємо

$$I = \frac{m l^2}{12} . \quad (1.26)$$

Контрольні питання

1. Дайте визначення поступальному й обертальному руху тіла.
2. Назвіть основні характеристики руху тіла та дайте їм визначення.
3. Дайте визначення характеристикам обертового руху.
4. Запишіть та поясніть кінематичне й динамічне рівняння поступального руху.
5. Дайте визначення силі та моменту сили. Сформулюйте другий закон Ньютона для поступального й обертового руху.
6. Момент інерції – визначення, одиниці виміру. Чи залежить момент інерції від положення осі обертання? Поясніть.
7. * Виведіть формулу (1.20) для визначення моменту інерції маятника Обербека.
8. * Розрахуйте момент інерції стрижня, що обертається навколо осі, яка проходить через його середину.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ПРУЖНІ ВЛАСТИВОСТІ ТІЛ. ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ЮНГА

Якщо зовнішні сили деформують тіло, у ньому виникають сили, що перешкоджають деформації. Це сили пружності. Механізм їхнього виникнення наступний. Будь-яке тіло складається з частинок (атомів, іонів, молекул), які перебувають у положенні рівноваги в недеформованому тілі. Рівновага досягається за рахунок балансу діючих між частинками сил притягання й відштовхування електричної природи, які залежать від відстані. На рис. 2.1 наведена залежність потенціальної енергії взаємодії (W) атомів або молекул від відстані між ними (r).

Область $W < 0$ відповідає притягання, $W > 0$ – відштовхуванню між частинками. Мінімум функції при $r = r_0$ відповідає рівновазі. Частинки роблять коливальні рухи поблизу r_0 («дна потенційної ями»).

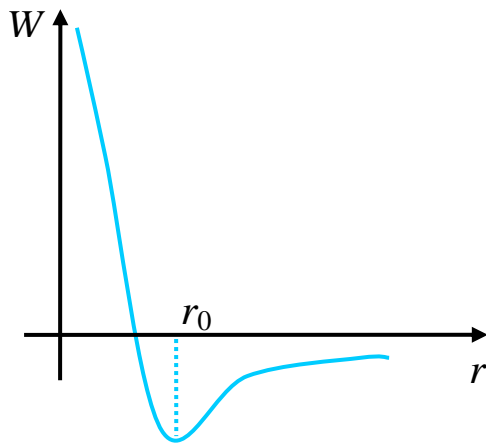


Рис. 2.1

Якщо рівновага порушується, наприклад, за рахунок дії зовнішньої сили зменшуються або збільшуються відстані між частинками, сили взаємодії між ними прагнуть відновити рівновагу.

На більших відстанях (r велике) частинки слабо взаємодіють ($W \rightarrow 0$). При зближенні частинок ($r < r_0$) W росте за абсолютною величиною (залишаючись негативною) – переважають сили притягання. Якщо r стає менше r_0 , виникають і починають виростати сили відштовхування.

Макроскопічно спостерігається намагання тіл (матеріалів) зберігати свій об'єм (для твердих тіл і форму) при дії зовнішніх сил. Чим більша деформація – тим більша сила пружності, яка виникає у тілі. Це твердження, справедливе для *малих пружних* деформацій, виражає *закон Гука*. Конкретна формула для закону Гука залежить від конкретного виду деформації.

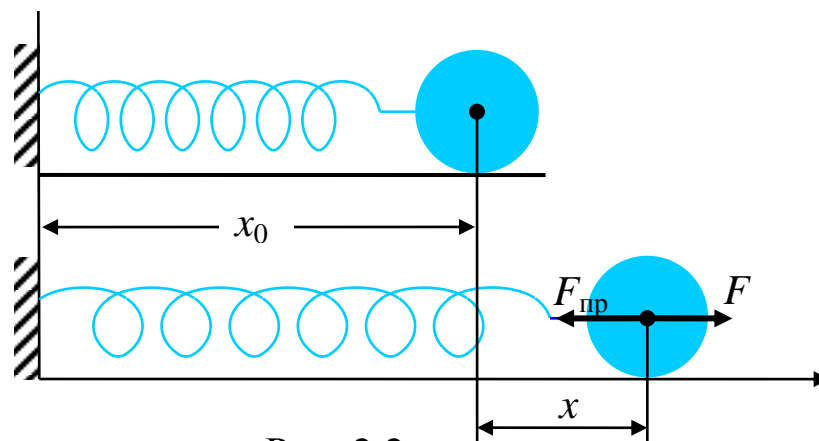


Рис. 2.2

Деформації однобічного розтягання (стискання) і зсуву – однорідні. Деформації крутіння й вигину – неоднорідні.

Деформація розтягання пружини

Сила \vec{F} розтягує пружину (рис. 2.2). У пружині виникає сила пружності

$$F_{np} = -kx, \quad (2.1)$$

де k – жорсткість пружини.

Однобічне розтягання стрижня

Сила \vec{F} розтягує стрижень, протилежний кінець якого закріплений (рис. 2.3). До кожної одиниці площі перерізу S стрижня прикладена напруга $\sigma = \frac{F}{S}$. Деформація характеризується

абсолютним $\Delta l = l - l_0$ і відносним подовженням $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ (деформацією).

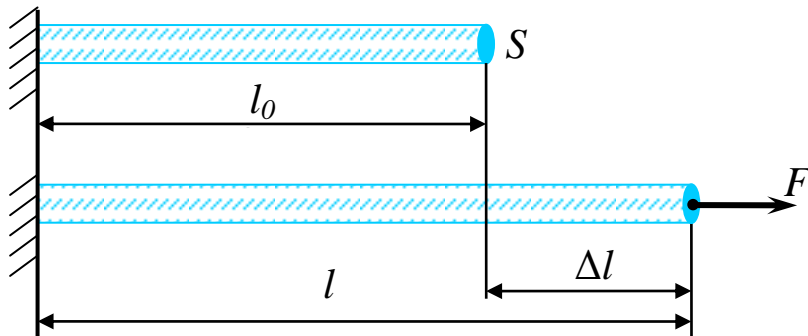


Рис. 2.3

Закон Гука в цьому випадку має вигляд:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (2.2)$$

де E – модуль Юнга, що характеризує пружні властивості матеріалу стрижня.

Деформація зсуву

Сила \vec{F} прикладена до верхньої грані стрижня прямокутного перерізу, нижня грань якого закріплена (рис. 2.4). При зсуві об'єм практично не змінюється. Деформація характеризується кутом зсуву (у радіанах).

Закон Гука:

$$\sigma \equiv \tau = G\theta, \quad (2.3)$$

де G – модуль зсуву.

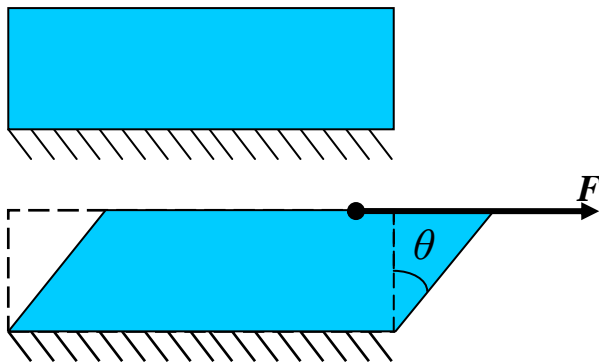


Рис. 2.4

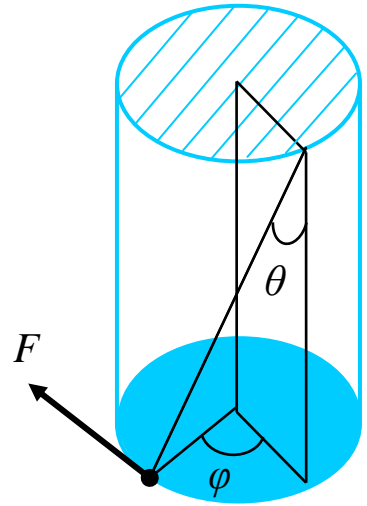


Рис. 2.5

Деформація крутіння

Сила \vec{F} прикладена до нижнього кінця стрижня (рис. 2.5), протилежний (на малюнку заштрихований) кінець якого закріплений. Сила створює обертаючий момент \vec{M} . Деформація характеризується кутом закручування φ .

Закон Гука:

$$M = D\varphi, \quad (2.4)$$

де D – модуль крутіння, залежить не тільки від матеріалу, але й від розмірів і форми тіла.

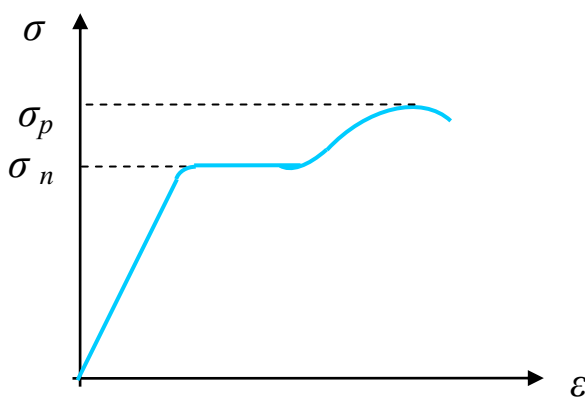


Рис. 2.6

Як відзначалося, закон Гука справедливий при малих пружних деформаціях. При більших зовнішніх силах деформації стають непружними (пластичними) – після зняття навантаження тіло не відновлює свої форми й об'єм.

На мал. 2.6 схематично наведена залежність $\sigma(\varepsilon)$ у випадку розтягання однорідного стрижня. Лінійна ділянка відповідає закону Гука лише для малих деформацій. Значення напруги σ_n , вище якої виникають залишкові деформації, називають межею пружності. Після зняття навантаження тіло буде мати ненульову деформацію. На горизонтальній ділянці графіка (рис 2.6) деформація зростає без збільшення прикладеної напруги – тіло «тече». Це область пластичних деформацій. Далі, після невеликого росту напруги, настає край міцності σ_p , за яким настає розрив стрижня.

У роботі вивчається деформація однобічного розтягання металевго дроту.

Мета роботи – визначення модуля Юнга, що характеризує пружні властивості матеріалу, з якого виготовлено дріт. Згідно з (2.2) модуль Юнга E визначається як

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (2.6)$$

звідки видно, що модуль Юнга дорівнює напрузі, яку потрібно прикласти до тіла, щоб його відносна деформація дорівнювала одиниці. Це означає, що довжина зразка збільшилася б у два рази. При таких великих деформаціях, однак, закон Гука не виконується.

Для визначення модуля Юнга необхідно одержати залежність $\sigma(\varepsilon)$, побудувати графік цієї залежності, визначити область виконання закону Гука та знайти E , користуючись формулою (2.6) для відповідної лінійної ділянки графіка.

Опис установки. Схема установки наведена на рисунку 2.7.

Дріт (1), що досліджується, закріплений на одному з кінців (2). Другий кінець (3) прикріплений до важеля (4), що повертається навколо горизонтальної осі (5), перпендикулярної площини малюнка, при цьому розтягуючи дріт. Змінювати прикладену до дроту напругу, що розтягує, можна, змінюючи положення вантажу (6) на важелі. Абсолютна деформація (подовження Δl) дроту вимірюється чутливим датчиком деформації (7).

Дослідним шляхом було встановлено, що переміщення вантажу на одну велику поділку шкали важеля відповідає зміні сили F , що розтягує, на 0,55 Н. Напругу можна визначити зі співвідношення

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{0,55 \cdot N}{\pi r^2}, \quad (2.5)$$

де N – число поділок важеля, r – радіус перерізу дроту. При зсуві вантажу (6) важіль повертається й дріт розтягується, що викликає поворот стрілки датчика (7). Поворот стрілки на одну найменшу поділку відповідає розтягання дроту, що рівнює 0,002 мм.

Оскільки відстані r_1 від осі обертання важеля (5) до вістря датчика й r_2 до точки кріплення рухливого кінця дроту різні, необхідно показання індикатора датчика помножити на коефіцієнт $k = \frac{r_1}{r_2} = 2,5$. Тоді відносна деформація:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{n \cdot 0,002 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5}{l_0}, \quad (2.6)$$

де n – число поділок датчика, l_0 –початкова довжина недеформованого дроту.

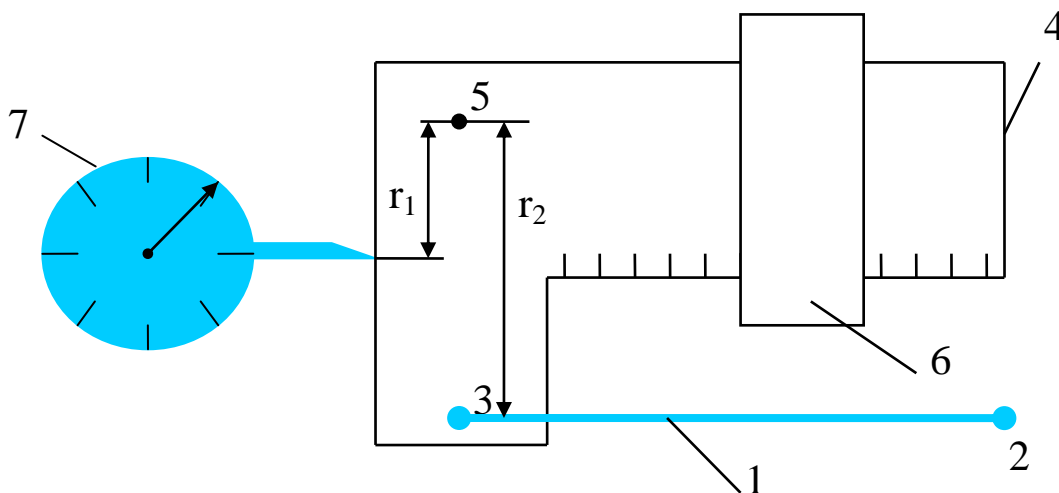


Рис 2.7

Виконання роботи

1. *Навантажують* дріт, змінюючи положення вантажу (6). Записують поділку положення важеля N і показання датчика n . За формулами (2.5) і (2.6) визначають напругу та деформацію.

Щоб переконатися, що деформація дроту була пружною й не виникло залишкових деформацій, проводять ті ж виміри, але *розвантажуючи* зразок.

Увага! Всі дані повинні бути занесені в таблицю й виражені в системі СІ.

2. За отриманими даними побудувати графік $\sigma(\varepsilon)$.

3. За лінійною ділянкою графіка визначити модуль Юнга як коефіцієнт лінійної залежності (тангенс кута нахилу), що відповідає формулі (2.2).

Контрольні питання

1. Поясніть природу виникнення сил пружності.
2. Сформулюйте закон Гука. Наведіть приклади.
3. Які види деформацій ви знаєте? Чим вони відрізняються?
4. Поясніть залежність напруги від деформації, що наведено на рисунку 2.6.
5. Що характеризує модуль Юнга? Чому він дорівнює?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

КОЛИВАННЯ

Гармонійні коливання тіло (матеріальна точка) робить, коли на нього діє сила F , величина якої пропорційна зміщенню x з положення рівноваги, а напрямок – протилежний напрямку зміщення

$$F = -kx, \quad (3.1)$$

тобто сила F завжди спрямована до положення рівноваги. Прикладом таких сил є сили пружності.

Сили, що не пружні за природою, але задовільняють закону пружних сил (3.1) – закону Гука – називаються *квазіпружними*. Тіло робить гармонійні коливання, якщо на нього діє пружна або квазіпружна сила.

Систему, що виконує гармонійні коливання, називають гармонійним осцилятором. Приклади: вантаж на пружині, маятник.

Зокрема, якщо на матеріальну точку маси m діє сила (3.1), рівняння руху її запишеться на підставі другого закону Ньютона ($ma = F$) так:

$$m\ddot{x} = -kx \quad (3.2)$$

або

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0, \quad (3.3)$$

де $a = \ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$ – прискорення, що здобувається матеріальною точкою m ,

\ddot{x} – друга похідна від зміщення за часом.

Позначимо

$$\frac{k}{m} = \omega^2. \quad (3.4)$$

Тоді диференціальне рівняння, що описує рух такої системи, має вигляд:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0. \quad (3.5)$$

Рівняння (3.5) – лінійне, однорідне диференціальне рівняння другого порядку. Його рішенням є $x(t)$ – залежність координати точки від часу, у чому можна переконатися простою підстановкою:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi), \quad (3.6)$$

де x – зміщення з положення рівноваги; A – амплітуда – максимальне зміщення; $(\omega t + \varphi)$ – фаза коливання (φ – початкова фаза, тобто фаза коливання при $t = 0$); ω – циклічна частота.

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T. \quad (3.7)$$

Циклічна частота показує, скільки коливань тіло робить за 2π секунд; ν – частота коливань – число коливань за одну секунду; T – *період* – тривалість одного коливання, тобто час, за який система вертається у вихідне положення. Залежність $x(t)$ представлена на рисунку (3.1).

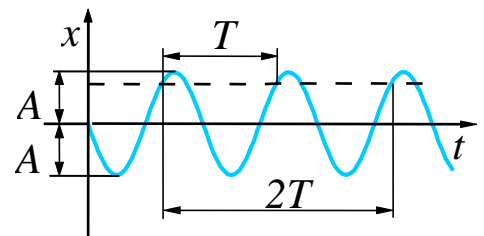


Рис. 3.1

Робота складається з двох частин: вивчення коливань математичного та фізичного маятників і загасаючих коливань.

1. Визначення прискорення сили тяжіння за допомогою математичного та фізичного маятника

Математичний маятник – це матеріальна точка (кулька), підвішена на довгій, невагомій нерозтяжній нитці (рис. 3.2). Якщо кульку відвести від положення рівноваги так, що нитка утворить кут α з рівноважним вертикальним положенням, то на кульку буде діяти сила \vec{F} , що прагне повернути її у положення рівноваги. Сила \vec{F} є рівнодіючою двох сил: сили ваги $m\vec{g}$ й сили натягу нитки T .

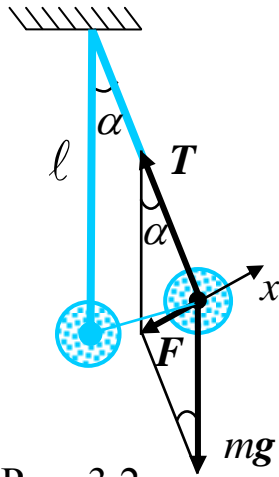


Рис. 3.2

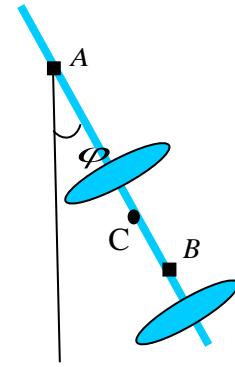


Рис. 3.3

З рис. 3.2 видно, що для малих α $F \approx mg \sin \alpha$, $\sin \alpha \approx x/l$. Отже, $F = -\frac{mg}{l}x$, оскільки вектор \vec{F} спрямований протилежно x , маємо знак мінус.

Рівняння руху маятника запишеться на підставі другого закону Ньютона ($ma = F$)

$$m\ddot{x} = -\frac{mg}{l}x$$

або
$$\ddot{x} + \frac{g}{l}x = 0 . \quad (3.8)$$

З порівняння формул (3.8) і (3.5) видно, що для математичного маятника

$$\omega^2 = \frac{g}{l} ,$$

а, отже, скориставшись (3.7), знайдемо період:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} . \quad (3.9)$$

Звідси можна визначити прискорення сили тяжіння g .

$$g = 4\pi^2 l / T^2 . \quad (3.10)$$

Тіло, що обертається (коливається) довкола нерухомої горизонтальної осі, яка не проходить через його центр мас, називається *фізичним маятником*. У роботі використаний стрижень із двома вантажами (рис. 3.3), який можна підвішувати і качати на закріплених біля його кінців призмах A і B . Такий маятник називають *оборотним*. У стані рівноваги центр мас (точка C) знаходиться на одній вертикалі з віссю обертання. При відхиленні на кут φ виникає момент сили тяжіння M і рух маятника можна описати рівнянням

(1.7), причому $M = -mgl \sin \varphi$, де l – відстань від осі до центра мас. При малих кутах $\sin \varphi \approx \varphi$, тоді

$$I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + mgl \varphi = 0. \quad (3.11)$$

Порівнюючи (3.11) із (3.5), маємо $\omega^2 = \frac{mgl}{I}$ або для періоду коливань

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}}. \quad (3.12)$$

Видно, що *період коливань залежить від моменту інерції маятника I , який, у свою чергу (див. 1.9), визначається розташуванням вантажів, що знаходяться на маятнику. Припустимо, що змінюючи положення вантажів, нам вдалося домогтися збігу періодів T_A і T_B коливань маятника навколо призм A і B :*

$$T = T_A = T_B = 2\pi \sqrt{I_1 / mgl_1} = 2\pi \sqrt{I_2 / mgl_2}. \quad (3.13)$$

Видно, що дане рівняння виконується, якщо рівними є підкореневі вирази, які мають розмірність довжини і називаються *наведеними довжинами*. За допомогою теореми Штейнера моменти інерції I_1 та I_2 можна записати через момент інерції I_0 відносно осі, яка проходить через центр мас ($l_1 = AC$, $l_2 = BC$)

$$I_1 = I_0 + ml_1^2, I_2 = I_0 + ml_2^2. \quad (3.14)$$

Виключаючи із (3.13) і (3.14) I_0 та m , маємо:

$$g = 4\pi^2 L / T^2, \quad (3.15)$$

де $L = l_1 + l_2$ – відстань між призмами A і B .

Мета роботи

Визначити прискорення сили тяжіння g .

Хід роботи

1. Вимірюють період коливань математичного маятника T і довжину l нитки. Виміри повторюють кілька разів, дані заносять у таблицю, знаходять середні значення. За формулою (3.10) знаходять прискорення сили тяжіння g .

2. Пересувають вантажі на фізичному маятнику і добиваються збігу періодів T_A і T_B коливань маятника навколо призм A і B . Вимірюють відстань між призмами і за формулою (3.15) визначають g .

2. Загасаючі коливання

При всякому вільному коливанні відбувається поступова витрата енергії руху на роботу проти сил тертя та сил опору середовища. При цьому амплітуда та швидкість коливального руху зменшуються, тобто відбувається загасання коливань.

Амплітуда загасаючих коливань зменшується згодом за експонентою:

$$A(t) = A_0 e^{-\beta \cdot t} , \quad (3.16)$$

де β – коефіцієнт загасання. Графік таких коливань наведений на рис. 3.4.

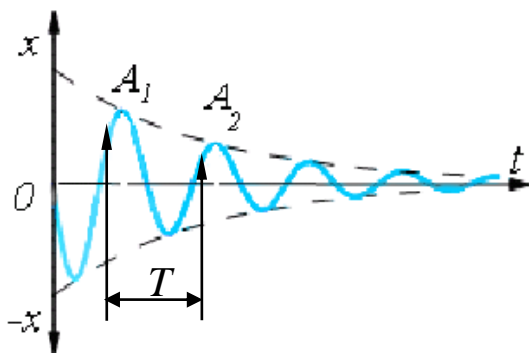


Рис. 3.4

Характерною рисою загасаючих коливань є те, що відношення будь-яких двох амплітуд, розділених за часом одним періодом, залишається постійним протягом усього процесу коливань. Дійсно, для амплітуд, розділених за часом одним періодом, згідно (3.16) можна записати

$$\frac{A_t}{A_{t+T}} = \frac{A_0 e^{-\beta \cdot t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = e^{-\beta T} = \text{const} . \quad (3.17)$$

Натуральний логарифм цього відношення, що характеризує загасання коливань за період, називають *логарифмічним декрементом загасання*. Він дорівнює:

$$\lambda = \ln \frac{A_t}{A_{t+T}} = \beta T . \quad (3.18)$$

Безпосередній вимір двох послідовних амплітуд A_1 і A_2 пов'язаний з великими похибками вимірів. Для більш точного визначення характеристик загасаючих коливань вимірюють дві амплітуди, відстань між якими n періодів. Тоді, наприклад,

$$\ln \frac{A_0}{A_n} = n\lambda \quad \text{або} \quad \lambda = \frac{1}{n} \ln \frac{A_0}{A_n} . \quad (3.19)$$

Використовуючи (3.18) і (3.19), можна знайти коефіцієнт загасання

$$\beta = \frac{1}{nT} \ln \frac{A_0}{A_n} . \quad (3.20)$$

Для полегшення розрахунків зазвичай час коливань nT обирають таким чином, щоб первісна амплітуда зменшувалася в ціле число разів, наприклад, удвічі. Тому

$$\frac{A_0}{A_n} = 2 , \quad \beta = \frac{1}{nT} \ln 2 = \frac{0.693}{nT} . \quad (3.21)$$

Знайдемо час τ , за який амплітуда зменшиться в e раз. За визначенням $e^{-\beta\tau} = e^{-1}$, звідки $\beta\tau = 1$. Отже, величина коефіцієнту загасання β зворотна тому проміжку часу, за який амплітуда зменшиться в e разів ($e = 2,7$).

Добротністю коливальної системи називається безрозмірна величина Q , що дорівнює відношенню енергії $E(t)$ коливної системи в довільний момент часу t до збитку цієї енергії за проміжок часу від t до $t+T$ (тобто за один умовний період загасаючих коливань), помноженому на 2π :

$$Q = \frac{E(t)}{E(t) - E(t+T)} 2\pi . \quad (3.22)$$

При малих значеннях логарифмічного декременту загасання ($\lambda \ll 1$) добротність коливальної системи

$$Q = \frac{\pi}{\lambda} . \quad (3.23)$$

Мета роботи – визначити величини, що характеризують загасання коливань: коефіцієнт загасання, логарифмічний декремент загасання, добротність.

Опис установки

Установка (рис. 3.5) являє собою вантаж (1), підвішений на пружному дроті (2), із закріпленням на ньому покажчиком (3). Для збільшення загасання вантаж поміщений у посудину (5) із трансформаторним маслом.

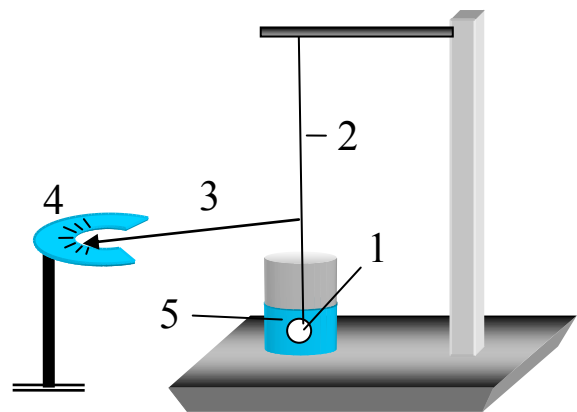


Рис. 3.5

Вимір амплітуди крутильних коливань робиться за допомогою покажчика (3) і шкали (4).

Хід роботи

1. Повернути вантаж на кут $3-5^0$. Він почне здійснювати крутильні коливання.

2. У момент, коли покажчик перебуває у межевому положенні на цілому числі поділок шкали, включити секундомір.

3. Вести перелік повних коливань n і, коли амплітуда зменшиться вдвічі, виключити секундомір, визначивши час t .

4. Обчислити період коливань за формулою $T = t/n$, де t – час, протягом якого вантаж зробив n повних коливань.

5. За формулою (3.21) визначити коефіцієнт загасання β , знаючи β , за формулою (3.18) визначити логарифмічний декремент загасання. Знаючи λ , за формулою (3.23) обчислити добротність. Виміри повторити п'ять разів і обчислити середні значення β , λ і Q .

Контрольні питання

1. Назвати основні характеристики гармонійних коливань.

2.*Виведіть формулу для періоду математичного маятника (3.9).

3. Чому прискорення вільного падіння однакове для всіх тіл? *Як і чому змінюється прискорення сили тяжіння g з широтою?

4. Як зміниться період коливань математичного маятника, якщо його перенести на Місяць?

5. Що називається фізичним маятником? *Виведіть формулу (3.15).

6. Які коливання називаються загасаючими? Які причини викликають загасання? Запишіть рівняння загасаючих коливань і його рішення.

7. Назвіть параметри, що характеризують загасання коливань у системі, та розкрийте їхній фізичний зміст.

МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ІДЕАЛЬНИЙ ГАЗ. ВИЗНАЧЕННЯ УНІВЕРСАЛЬНОЇ ГАЗОВОЇ СТАЛОЇ

Стан термодинамічної системи може бути охарактеризований трьома основними параметрами: об'ємом V , тиском P , температурою T . Рівняння, що зв'язує ці параметри, називається *рівнянням стану*. Для ідеального газу воно являє собою рівняння Менделєєва – Клапейрона

$$PV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (4.1)$$

де m – маса газу, μ – молярна маса (маса одного моля газу), R – універсальна газова стала. Універсальною її називають тому, що вона однакова для одного моля *будь-якого* ідеального газу. Із закону Авогадро 1 моль будь-якого газу займає об'єм 22,4 л за нормальних умов, тобто при $P = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ й $T = 273 \text{ К}$. Підставляючи ці значення в (4.1), одержимо, що газова стала дорівнює

$$R = 8,31 \text{ Дж/моль К}.$$

Фізичний сенс R полягає у тому, що вона чисельно дорівнює роботі, яку може зробити 1 моль газу, розширюючись внаслідок нагрівання на 1 градус при постійному тиску.

Мета роботи – визначити універсальну газову сталу експериментально. Для цього можна використати (4.1). Об'єм газу (повітря) дорівнює об'єму колби, у яку він поміщений, тиск можна виміряти манометром, температуру – термометром, молярна маса повітря відома – 28,8 кг/кмоль.

Проблема, однак, полягає у визначенні маси газу. Масу визначають зважуванням, але при кожному вимірі ми будемо одержувати значення сумарної маси повітря й колби. Як же знайти масу саме повітря? Для цього діють у такий спосіб. Насамперед, помітимо, що якщо газу в колбі немає ($m = 0$), тоді й тиск, природно, дорівнює нулю. Тому, якщо змінювати тиск газу й побудувати графік залежності $P(M)$, де M – це експериментально вимірювана маса колби з повітрям, то маса, при якій $P = 0$, на цьому графіку буде відповідати масі *порожньої* колби M_0 . Тоді масу газу в колбі при кожному тиску легко визначити за різницею

$$m = M - M_0 \quad (4.2)$$

і підстановкою будь-якої пари *відповідних* значень m і P у (4.1) знайти R .

Виконання роботи

Опис установки

Установка складається з колби, манометра для виміру тиску й насоса для зміни тиску повітря в колбі. Скляна колба за допомогою гумового паростка із затиском приєднується до вакуумної установки.

Хід роботи

Як зазначено вище, необхідно побудувати графік залежності тиску повітря P від маси колби з повітрям M . Для цього колбу приєднують до установки гумовим паростком і *відкачують* насосом

повітря до мінімального тиску (повністю, до нуля, відкачати повітря не вдається, залишкова маса газу буде в колбі присутня). Перекривають паросток затиском, від'єднують колбу й зважують, визначаючи M . Потім приєднують колбу до установки знову й, відкриваючи затиск, *впускають* деяку кількість повітря, за манометром визначають тиск і знову зважують. Повторюють виміри 5-6 разів, останній раз проводячи зважування при атмосферному тиску.

Варто мати на увазі, що манометр показує не тиск повітря в колбі, а *різницю між ним і атмосферним тиском*. Перерахування поділок шкали манометра N у значення тиску, вираженого в паскалях, роблять за формулою

$$P = P_0 (1 - 0,01N),$$

де P_0 – атмосферний тиск, незалежно обмірюваний барометром, наявним у лабораторії. Усі дані вимірів (N , M , P) заносять у таблицю. Будують графік залежності $P(M)$, екстраполують (продовжують) його до нульового тиску й визначають масу *порожньої колби* M_0 . Знаходять масу повітря, як зазначено вище (4.2), і з рівняння (4.1) визначають газову сталу.

Контрольні питання

1. Опишіть схему установки та послідовність виконання роботи.
2. Дайте визначення ідеального газу.
3. Які параметри характеризують стан ідеального газу? У яких одиницях вони вимірюються в системі СІ? За допомогою яких приладів?
4. Рівняння Менделєєва-Клапейрона.
5. Поясніть фізичний сенс універсальної газової сталої.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ФІЗИЧНА КІНЕТИКА. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА

Реальні рідини та гази мають в'язкість (внутрішнє тертя). Це явище спостерігається в газах і рідинах, що рухаються, і приводить до вирівнювання швидкостей різних шарів. В'язкість також впливає на рух тіл у нерухомих газах і рідинах.

Розглянемо ламінарний (без перемішування) плин рідини або газу під дією різниці тисків на кінцях труби. За перерізом труби

встановлюється розподіл швидкостей окремих шарів (рис. 5.1).

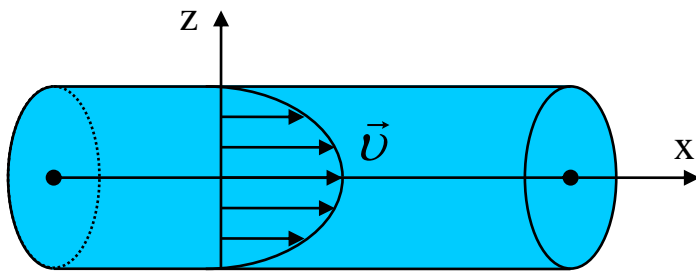


Рис. 5.1

Молекули сусідніх шарів зіштовхуються в результаті теплового руху. При цьому вони обмінюються імпульсами ($p = mv$), у результаті чого відбувається вирівнювання швидкостей шарів у напрямку осі Z . Таким

чином, на молекулярно-кінетичному рівні в'язкість обумовлена переносом імпульсу від шару до шару в рідині, що рухається. Зміна імпульсу в одиницю часу, відповідно до другого закону Ньютона, дорівнює силі

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} . \quad (5.1)$$

Ця сила, що виникає за рахунок зміни імпульсу шарів і діє між сусідніми шарами, й називається силою в'язкості або внутрішнім тертям. Вона дорівнює

$$F = -\eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S , \quad (5.2)$$

де η – коефіцієнт в'язкості, що залежить від природи рідини та її стану (наприклад, температури) і вимірюється в паскаль-секундах (Па*с) або (кг/м*с);

$\left| \frac{dv}{dz} \right|$ – модуль градієнта швидкості, що показує, як швидко змінюється швидкість у напрямку осі z ; S – площа змикання шарів.

При русі тіла в густому середовищі на нього діє сила опору, що залежить від характерного лінійного розміру тіла r і його швидкості v , а також від в'язкості середовища. Для невеликих швидкостей справедливий закон Стокса

$$F = c\eta v r , \quad (5.3)$$

де c – стала, залежна від форми тіла; η - коефіцієнт в'язкості рідини.

Для кулі стала $c = 6\pi$ і сила опору

$$F = 6\pi\eta v r , \quad (5.4)$$

де r – радіус кулі.

Скориставшись формулою Стокса, можна експериментально визначити коефіцієнт в'язкості рідини.

Розглянемо кульку, що вільно падає в рідині (рис. 5.2). На кульку діють три сили: сила тяжіння $F_1 = \rho_1 V g$ (ρ_1 – густина речовини кульки; V – її об'єм), спрямована вертикально вниз; сила, що виштовхує – архімедова $F_2 = \rho_2 V g$ (ρ_2 – густина рідини), спрямована вертикально нагору; і сила опору $F_3 = 6\pi\eta r v$, також спрямована нагору.

Спочатку кулька рухається прискорено. Прискорення створюється рівнодіючою всіх трьох сил, причому сила тяжіння й сила, що виштовхує, не змінюються в процесі руху. У міру збільшення швидкості руху кульки росте пропорційно їй сила опору (5.3). У результаті сили, що діють на кульку, компенсуються, і вона продовжує далі рухатися відповідно до першого закону Ньютона з постійною швидкістю.

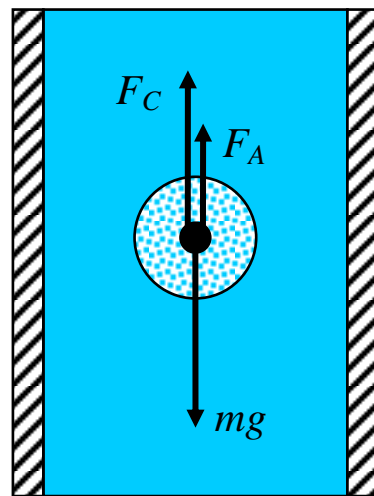


Рис. 5.2

Умова усталеного руху:

$$\sum \vec{F}_i = 0;$$

тоді

$$F_1 - F_2 - F_3 = 0; \quad (5.5)$$

$$\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_1 - \rho_2) g = 6\pi\eta r v; \quad (5.6)$$

$$\eta = \frac{2r^2(\rho_1 - \rho_2)g}{9v}. \quad (5.7)$$

У роботі досліджується температурна залежність коефіцієнта в'язкості гліцерину.

Виконання роботи

Мета роботи – визначити коефіцієнт в'язкості гліцерину при різних температурах, побудувати графік залежності $\eta(T)$.

Опис установки

Установка являє собою довгу скляну трубку, що розташована вертикально й заповнена гліцерином. У роботі використовуються сталеві кульки. На трубці є дві мітки на відстані L між ними. Верхня

мітка розташована на такій відстані від поверхні рідини, що нижче її кулька вже рухається зі сталою швидкістю.

Хід роботи

1. Опускають кульку в рідину якнайближче до осі трубки. Вимірюють секундоміром час τ проходження кулькою відстані між мітками L .

Визначають швидкість руху кульки за формулою

$$v = \frac{L}{\tau} . \quad (5.8)$$

2. Розраховують коефіцієнт в'язкості за формулою (5.7) для кімнатної температури.

3. Вмикають електронагрівач і нагрівають рідину до 50°C . Готують таблицю для запису результатів вимірювань T, τ, v, η .

4. Після цього *в міру охолодження* рідини через кожні 5°C визначають η . Будують графік отриманої залежності $\eta(T)$.

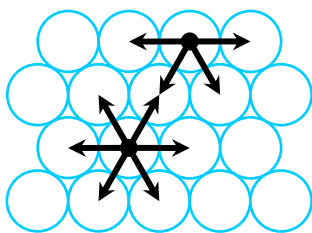
Контрольні питання

1. Поясніть природу сил в'язкості в рідині.
2. Від чого залежить сила опору, що діє на тіло, яке рухається в густому середовищі?
3. Які сили діють на падаючу кульку? Як змінюється характер її руху?
4. *Як можна пояснити отриману залежність коефіцієнта в'язкості рідини від температури?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

ПОВЕРХНЕВИЙ НАТЯГ

На відміну від рідини, газ не має власного об'єму. Його об'єм дорівнює об'єму посудини, у якій він перебуває. Між молекулами рідини існують помітні сили притягання (когезії) електромагнітної природи. Це приводить до того, що рідина має власний об'єм, а значить і *поверхню*, що відокремлює цей об'єм від іншого простору.



На молекулу, що перебуває *усередині* рідини, з боку сусідів діють сили притягання, рівнодіюча яких у середньому дорівнює нулю (рис. 6.1). Молекули рідини, що перебувають *на поверхні*, зазнають рівнодіючу силу, що *не дорівнює нулю* та

Рис. 6.1

спрямована вглиб рідини. Це приведе до скорочення поверхні – *поверхневого натягу*.

Якщо спробувати розтягнути поверхню рідини, потрібно прикласти зовнішню силу проти сил зчеплення молекул. Робота dA сили, що розтягує поверхню, дорівнює *вільній енергії* dE , якою буде володіти додаткова поверхня dS , що *утвориться* при розтяганні

$$dA = dE = \sigma \cdot dS, \quad (6.1)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу.

Таким чином, збільшуючи поверхню рідини, ми збільшуємо її енергію. Завдяки поверхневому натягу, будь-який об'єм рідини прагне, навпаки, зменшити площу поверхні. При цьому варто пам'ятати, що рідини слабо стискаються, і зменшити їхній об'єм практично не вдається (молекули енергійно відштовхуються при спробі стиснути рідину). Ці два фактори – поверхневий натяг і нестисливість рідини – приводять до того, що рідина буде мати мінімальну поверхню при заданому об'ємі – це поверхня сфери (саме тому краплі рідини сферичні, а не циліндричні або, наприклад, кубічні). Сферична форма крапель може бути деформована дією сили тяжіння.

Для розрахунків зручно використовувати силу поверхневого натягу F_n , спрямовану за дотичною до поверхні та пропорційну довжині контуру l , що обмежує поверхню. Обрана у такий спосіб сила приведе до того ж спостережуваного ефекту – скорочення поверхні.

$$F = -\frac{dA}{dx} = -\frac{\sigma \cdot dS}{dx} = -\sigma \cdot l. \quad (6.2)$$

Знак мінус показує, що сила спрямована убік, протилежний розтяганню поверхні dx .

Тоді видно, що коефіцієнт поверхневого натягу σ дорівнює силі, що діє на одиницю довжини контуру l

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad [\sigma] = \text{Н/м}. \quad (6.3)$$

Сила поверхневого натягу створює надлишковий тиск під

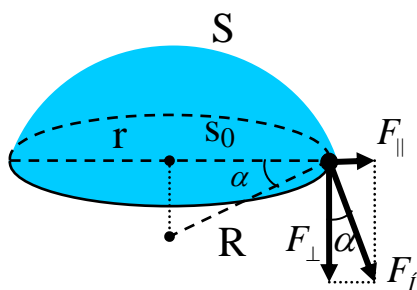


Рис. 6.2

скривленою поверхнею рідини.

Нехай поверхня має форму сфери радіуса R (рис. 6.2). Виділимо на цій сфері ділянку площею S , що опирається на підставу – площадку S_0 . Рівнодіюча сил поверхневого натягу F , що діють по периметру цієї площадки, спрямована перпендикулярно до площадки та дорівнює

$$F_{\perp} = F \cos \alpha = \sigma \cdot l \cos \alpha = \sigma \cdot 2\pi r \cos \alpha .$$

З малюнка 6.2 видно, що $\cos \alpha = r/R$.

$$F_{\perp} = \frac{\sigma \cdot 2\pi r^2}{R} , \quad (6.4)$$

а складові F_{\parallel} у сумі дають нуль. Таким чином, сила поверхневого натягу створить *додатковий тиск Δp під скривленою поверхнею рідини*, рівний

$$\Delta p = \frac{F_{\perp}}{S} = \frac{F_{\perp}}{\pi r^2} = \frac{2\sigma}{R} . \quad (6.5)$$

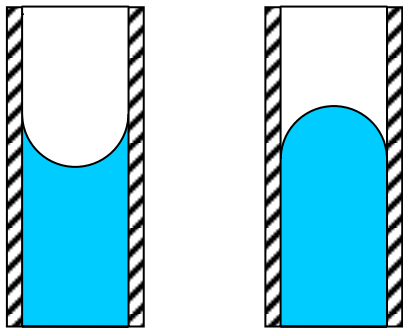


Рис. 6.3

Капілярні явища

Якщо рідина налита в посудину та межує зі стінками, то виникає взаємодія між молекулами рідини й молекулами стінки. Ця взаємодія приведе до викривлення поверхні рідини поблизу стінки. Скривлена поверхня рідини називається *меніском*. У широких посудинах поверхня рідини

викривляється тільки поблизу стінок, але в капілярах скривленою виявляється вся поверхня рідини. Сили поверхневого натягу, як було зазначено, прагнуть стягнути, стиснути поверхню рідини. У результаті дії цих сил, скривлена поверхня рідини натискає на повітря, що перебуває над нею, якщо меніск увігнутий (змочування) або на рідину під скривленою поверхнею, коли меніск опуклий (не змочування) (рис 6.3). Цей створений силами поверхневого натягу тиск, приводить до підняття рівня рідини в капілярах.

Дійсно, якщо в широку посудину з рідиною опустити тонку трубку – капіляр, то рівень рідини в ньому у випадку змочування виявиться вищим, ніж у широкій посудині. Це відбувається тому, що під скривленою поверхнею меніска виникає додатковий тиск, який «спрямований» до центра кривизни поверхні, тобто протилежно

атмосферному. У результаті тиск над рідиною в капілярі виявляється менше атмосферного на величину Δp (6.5), і рідина починає рухатися убік низького тиску – нагору. У міру росту стовпчика рідини у капілярі, росте його вага, що створює спрямований долілиць гідростатичний тиск

$$p = \frac{mg}{S} = \frac{\rho Vg}{S} = \frac{\rho g \cdot \pi r^2 \cdot h}{\pi r^2} = \rho gh . \quad (6.6)$$

Коли додатковий тиск стає рівним гідростатичному, підйом рідини припиняється, установлюється рівновага.

$$\rho gh = \frac{2\sigma}{R} . \quad (6.7)$$

Звідси можна знайти висоту підйому рідини h :

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R} . \quad (6.8)$$

Виконання роботи

Мета роботи – визначити коефіцієнт поверхневого натягу рідини різними методами.

1. Метод зважування крапель

Опис установки й хід роботи

1. Налити воду у вертикальну трубку й відрегулювати її витікання по краплі (рис.6.4).

2. Відрив краплі відбувається, коли її вага mg стає більше, ніж сили поверхневого натягу F_n , що діють по контуру шийки краплі. У момент, що передує відриву $mg = F_n$

$$mg = \sigma \cdot \pi d , \sigma = \frac{mg}{\pi d} , \quad (6.9)$$

де d – діаметр шийки краплі в момент відриву.

3. Спостерігаючи за відривом крапель за допомогою мікроскопа, необхідно виміряти діаметр шийки. Для цього число поділок шкали окуляра необхідно помножити на ціну поділки (значення однієї найменшої поділки шкали в міліметрах). Визначити ціну поділки

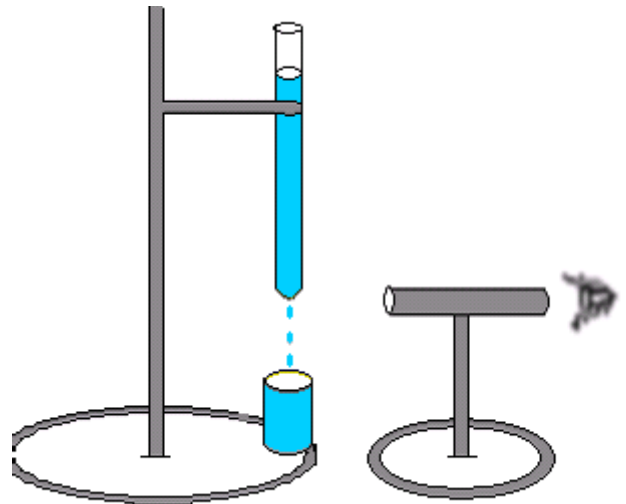


Рис. 6.4

можна, спостерігаючи еталонну міліметрову лінійку в даний мікроскоп.

4. Масу краплі визначають зважуванням. Зважену порожню склянку поміщають під потік крапель рідини, що витікає з трубки, і рахують кількість крапель, що впали в склянку (30-50 крапель). Після чого зважують склянку з рідиною й визначають масу однієї краплі.

5. За формулою (6.9) знаходять коефіцієнт поверхневого натягу води.

2. Метод визначення коефіцієнта поверхневого натягу за висотою підйому в капілярі

Опис установки і хід роботи

1. У широку склянку з водою занурені дві капілярні трубки з різними радіусами внутрішніх каналів. Рівні рідини в каналах згідно (6.8) різні. Різниця рівнів у двох трубках:

$$h_1 - h_2 = \frac{2\sigma}{\rho g} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (6.10)$$

де ρ – густина води.

2. Різницю рівнів вимірюють за допомогою мікроскопа. Для виміру різниці рівнів рідини у двох капілярах наводять мікроскоп на один з менісків і сполучають із ним деяку довільну поділку шкали. Записують дану поділку шкали й показання мікрометричного гвинта мікроскопа. Не пересуваючи мікроскоп, за допомогою мікрометричного гвинта сполучають записану поділку шкали з меніском у другому капілярі. Знаходять різницю рівнів. Повторюють вимір не менше трьох разів і визначають середнє значення. За формулою, що випливає з (6.10),

$$\sigma = \frac{\rho g (h_1 - h_2) r_1 r_2}{2(r_2 - r_1)} \quad (6.11)$$

обчислюють коефіцієнт поверхневого натягу.

3. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу за методом Ребіндера

Співвідношення (6.5), що пов'язує надлишковий тиск під скривленою поверхнею з її радіусом, дозволяє визначити коефіцієнт поверхневого натягу за методом Ребіндера, який полягає у наступному.

Опис установки і хід роботи

Рідина (вода), що досліджується, міститься в посудині, що закрита коркою. В корку вставлена тонка скляна трубка, нижній кінець якої торкається поверхні рідини, а верхній відкритий в атмосферу. За допомогою повітряного насоса в посудині створюється розрідження повітря, що знаходиться над поверхнею рідини. Атмосферний тиск штовхає повітря по трубці, і біля її нижнього кінця утворюється повітряна бульбашка, що спливає. Радіус бульбашки r буде змінюватись відповідно до зростаючої різниці тисків Δp при відкачці повітря. Спочатку r більше радіуса трубки R , далі він зменшується і стає рівним R (рис. 6.5). Менше ніж R радіус бульбашки стати не може, тому тиск, який компенсується поверхневим натягом, не перебільшує

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}.$$

Вважаючи в даній формулі, що $r = R$, ми вносимо похибку, оскільки зазвичай трубка не має у перерізі ідеального кола.

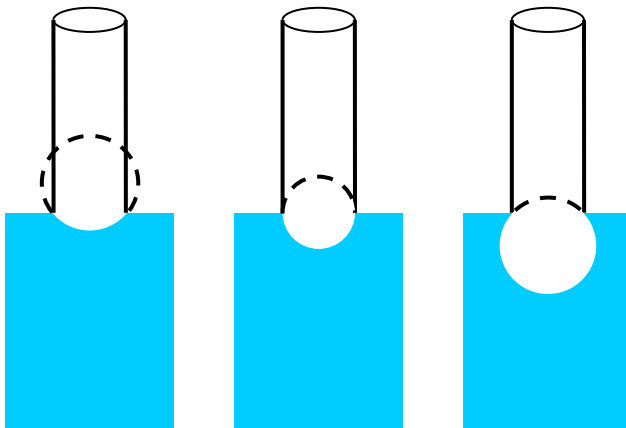


Рис. 6.5

Визначення $\rho g \Delta h = \Delta p$ проводять за допомогою водяного манометра в момент відриву повітряної бульбашки.

Якщо трубка занурена в рідину на глибину H , необхідно взяти до уваги відповідний гідростатичний тиск і формула (6.5) буде мати вигляд

$$\rho g \Delta h = \frac{2\sigma}{R} + \rho g H. \quad (6.12)$$

Звідки

$$\sigma = \frac{\rho g (\Delta h - H) R}{2}. \quad (6.13)$$

Для виконання роботи пропонується наступний порядок дій.

1. Виміряти температуру води в посудині за допомогою термометра.
2. Відкачати повітря в посудині насосом до появи повітряної бульбашки біля нижнього краю трубки.
3. У момент відриву бульбашки виміряти водяним манометром Δp . Визначити σ за формулою (6.13).
4. Нагріваючи рідину, повторити виміри через кожні 10 градусів.
Отримані дані занести до таблиці.
5. Побудувати графік температурної залежності $\sigma(t)$.

Контрольні питання

1. Чим обумовлена різниця властивостей рідин і газів?
2. Яка природа сил поверхневого натягу?
3. Фізичний зміст коефіцієнта поверхневого натягу. Від чого він залежить і в яких одиницях вимірюється?
4. Від чого залежить висота підняття рідини в капілярах? У якому випадку рівень рідини в капілярі нижче, ніж у широкій посудині?
5. * На яку висоту підніметься рідина (вода) по стеблу колосся, якщо діаметр капіляра 0,05 мм? Зробіть оцінку, використавши коефіцієнт поверхневого натягу, обчислений у роботі.

ЕЛЕКТРИКА ТА МАГНЕТИЗМ

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

РОЗШИРЕННЯ ГРАНИЦЬ ВИМІРІВ АМПЕРМЕТРА Й ВОЛЬТМЕТРА

Основними характеристиками електричних кіл є сила струму I , напруга U , опір R .

Силу струму в електричних колах вимірюють амперметрами. Принцип дії їх може бути різний. У наш час застосовують стрілочні та цифрові прилади, індикаторами струму в яких служить стрілка зі шкалою або цифрове табло. У лабораторній практиці вживаються стрілочні прилади магнітоелектричної й електромагнітної систем.

У приладах *магнітоелектричного* типу вимірюваний струм протікає по котушці, розташованій між полюсами постійного магніту. Котушка закріплена на осі, з якої скріплені також дві спіральні пружини й стрілка. Під час відсутності струму площа котушки

паралельна лініям магнітного поля. При протіканні струму виникає прикладена до котушки сила Ампера, яка створює обертаючий момент. При цьому стрілка повертається. Відхиленню котушки зі стрілкою на максимальний кут при будь-якому струмі перешкоджають пружні сили пружин, на яких вона кріпиться. У результаті кут повороту всієї системи буде пропорційний I , що тече по котушці. Вимірюється даний кут величиною переміщення стрілки по шкалі приладу, градуйованій в амперах. *Градування робиться порівнянням показів даного приладу з показами еталонного.*

Прилади цієї системи придатні тільки для виміру постійних струмів. Зменшуючи сили тертя в опорах осі й послабляючи протидіючі моменти пружних сил, можна виготовити прилади, розраховані на вимір дуже малих струмів, що мають високу

чутливість. Чутливістю приладу називають відношення $S = \frac{dn}{dI}$, де dn – число поділок, на яке переміщається стрілка приладу при зміні струму dI . Збільшити чутливість наявного приладу не можна.

У приладах *електромагнітного типу* струм, що вимірюється, проходить по нерухливій котушці, створюючи в ній неоднорідне магнітне поле. Поблизу міститься пластинка або стрижень (сердечник) із магнітом'якого заліза (з малою коерцитивною силою). Дія приладу ґрунтується на втягуванні сердечника, скріпленого зі стрілкою, в неоднорідне магнітне поле котушки.

Прилади цієї системи придатні для виміру і постійних, і змінних струмів.

Кожний прилад, призначений для виміру сили струму, розрахований на певне *максимальне значення струму* I_{max} , яке називається *границя вимірів*.

Розширити границю вимірів приладу, тобто вимірювати їм струми значно більші, ніж ті, на які він розрахований, можна. Для цього досить паралельно приладу підключити *шунт* – опір, підібраний так, що деяка частина струму пройде через нього (рис. 7.1). Через прилад тепер іде *частина загального струму*.

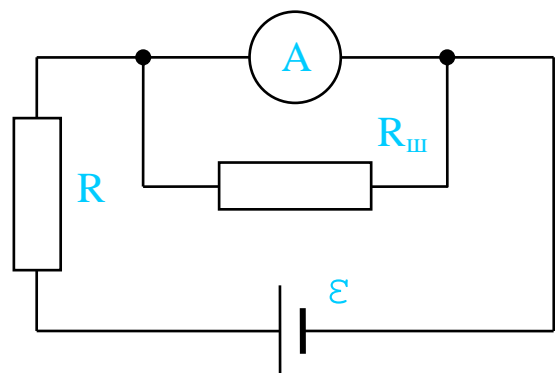


Рис. 7.1

Зашунтований амперметр потрібно проградувати за допомогою еталонного амперметра, тобто поділкам його шкали поставити у відповідність реальні значення струму в колі, які покаже еталонний прилад.

Шунтування використовують у багатошкальних приладах. За допомогою перемикача може бути підключений кожний із вбудованих шунтів. Максимальну силу струму, що вимірюється приладом при підключенні даного шунта, вказують на корпусі приладу біля перемикача. Ціну поділки шкали визначають як відношення максимального струму до повного числа поділок шкали N :

$$\text{ціна поділки} = \frac{I_{\max}}{N}.$$

Напругу в електричних колах вимірюють вольтметрами. Вольтметр підключають паралельно опору ділянки ланцюга, на якій міряють напругу (рис. 7.2). Будова і принцип дії вольтметрів не відрізняються від будови та принципу дії амперметрів. Струм I_V відгалужується у вимірювальну систему вольтметра й приводить її в

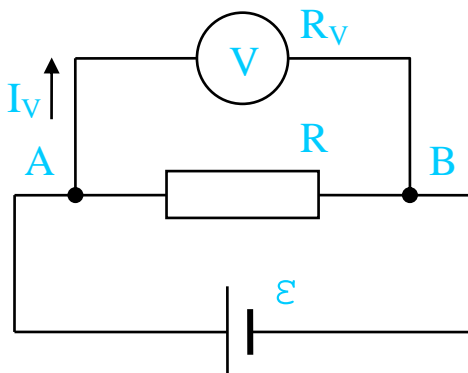


Рис. 7.2

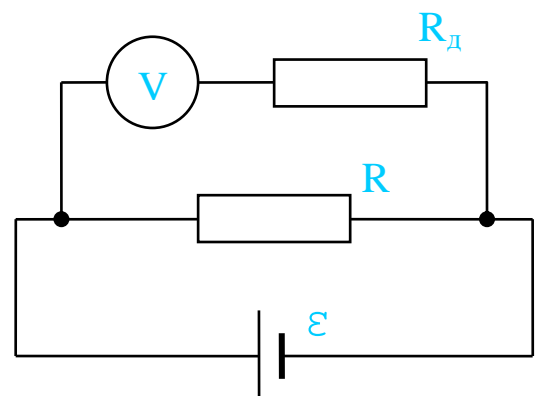


Рис. 7.3

рух.

На шкалі ж нанесені поділки, що відповідають не току, а спаданню напруги на внутрішньому опорі R_V , що дорівнює напрузі між точками А і В схеми: $U_{AB} = I_V R_V$.

Принциповою відмінністю вольтметрів від амперметрів є величина внутрішнього опору. Внутрішній опір вольтметра повинен бути великим, щоб струм I_V , що у нього відгалужується, і зміни, внесені в електричне коло підключенням вольтметра, були мінімальні.

Розширити межі виміру вольтметра можна, якщо послідовно з

приладом підключити деякий додатковий опір R_A (рис. 7.3). При цьому на вольтметр буде припадати лише частина вимірюваної напруги, і після градуювання їм можна буде вимірювати більші напруги, ніж ті, на які він спочатку розрахований.

Виконання роботи

Мета роботи – ознайомлення з електровимірювальними приладами, розширення границь вимірів і градуювання амперметра й вольтметра.

Хід роботи

1. *Шунтування і градуювання амперметра по постійному струму.*

Зібрати схему (рис. 7.4). Послідовно з навантаженням R_2 включити стрілочний прилад (А), що досліджується, та еталонний (зразковий) цифровий (Р). Схему підключити до джерела напруги, клема якого позначені на панелі – U .

Зняти залежність числа поділок шкали від сили струму $n = n(I)$. Побудувати градуювальний графік $n(I)$. Визначити ціну поділки й чутливість приладу.

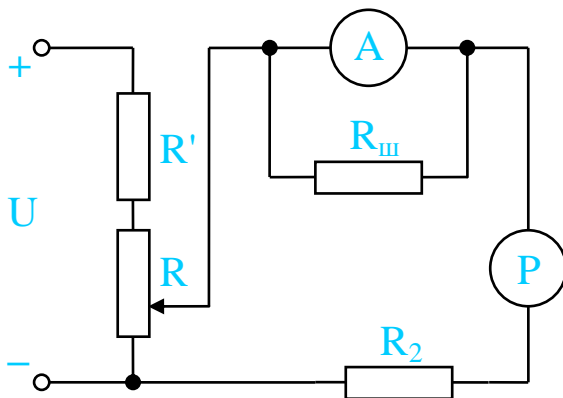


Рис. 7.4

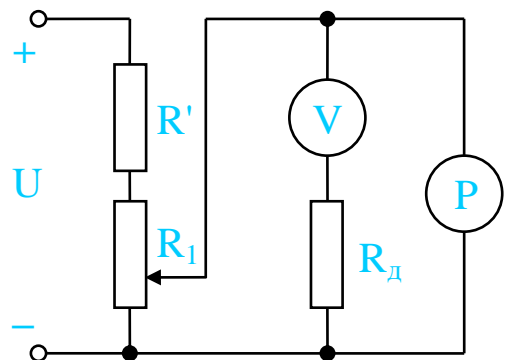


Рис. 7.5

2. *Розширення границі вимірів і градуювання вольтметра по постійній напрузі.*

В якості вольтметра (V) використовується той же стрілочний прилад, що й при виконанні попереднього завдання, до якого підключається додатковий резистор $R_d = R_2$. Зібрати схему (рис. 7.5). Переключити еталонний прилад на вимір напруги. Зняти залежність числа поділок n шкали приладу від напруги між точками АВ – $n(U)$. Побудувати градуювальний графік. Визначити ціну поділки й чутливість приладу.

Контрольні питання

1. Дайте визначення основним фізичним величинам, що характеризують постійний електричний струм. Назвіть прилади для їхнього виміру.
2. *Який принцип дії приладів магнітоелектричної й електромагнітної систем?
3. Що таке чутливість і ціна поділки приладу?
4. Для чого підключають шунти до амперметрів?
5. Як можна розширити границю вимірів вольтметра?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

ЕЛЕКТРОННИЙ ОСЦИЛОГРАФ. ВИЗНАЧЕННЯ АМПЛІТУДИ Й ЧАСТОТИ ЗМІННОГО СИГНАЛУ

Електронний осцилограф (ЕО) призначений для дослідження *змінних* струмів і напруг – виміру їхніх амплітуд, частот, фаз, визначення тривалості (періодів), форми сигналів і інших характеристик. Межі застосування ЕО надзвичайно різноманітні як у наукових дослідженнях, так і в інженерній практиці.

Мета роботи – усвідомити принцип дії і призначення електронного осцилографа. Навчитися використовувати осцилограф для спостереження форми сигналу; виміру напруги, частоти, різниці фаз; вивчити явища, що виникають при додаванні коливань однакового напрямку й взаємно перпендикулярних коливань.

Будова та принцип дії осцилографа

Будь-який осцилограф складається з електронно-променевої трубки (ЕПТ), каналів вертикального Y і горизонтального X відхилень електронного пучка, генератора розгорнення, блоку живлення й органів керування.

В осцилографі для виміру струмів і напруг індикатором служить не стрілка, а пучок електронів. Електрони мають малу масу й ними легко керувати за допомогою електричного поля, тому що вони заряджені. Ударяючись об екран, вкритий спеціальною фарбою (люмінофором), вони викликають його світіння, що дозволяє візуально досліджувати змінні за часом процеси.

ЕПТ (рис. 8.1) складається з відкачаної до високого вакууму скляної колби, усередині якої міститься джерело електронів катод (1) (негативний електрод), що нагрівається ниткою розжарювання (2). У

результаті термоелектронної емісії електрони залишають катод. Катод перебуває усередині циліндричного електрода (3), що є керуючим. Зміною негативного потенціалу на цьому електроді регулюється кількість електронів, які проходять через його отвір, що змінює яскравість плями на екрані (8) ЕПТ. Перший анод (4) (позитивний електрод) слугує для фокусування, а другий анод (5) – для прискорення електронів. Нагрівач, катод, електрод що управляє, і обидва аноди утворюють електронну гармату.

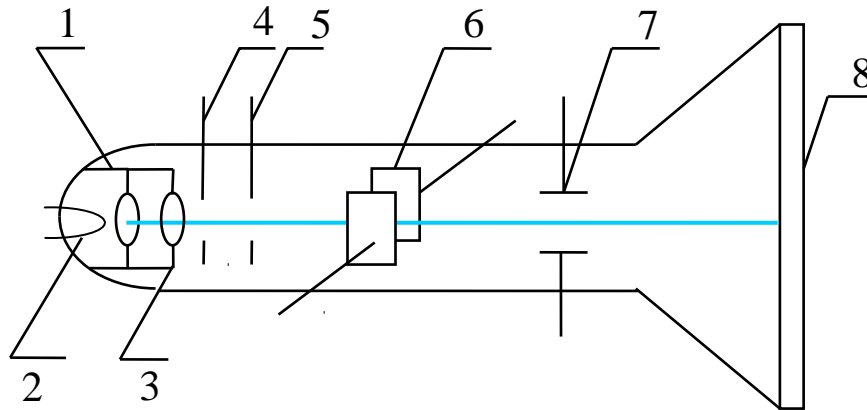


Рис. 8.1

Вийшовши з електронної гармати, сформований електронний промінь проходить між двома парами металевих пластин (6) і (7), що слугують для його відхилення. Якщо електричне поле між пластинами відсутнє, то електронний промінь не відхиляється й при відповідній юстировці електронно-оптичної системи потрапляє у центр екрана ЕПТ, викликаючи його світіння.

Якщо до відхиляючих пластин підключити напругу, що вимірюється, то електричне поле, що виникає між ними, діючи на електронний пучок, викличе його відхилення, й пляма на екрані зміститься. Вертикально розташовані пластини (6) слугують для відхилення променя в горизонтальній площині (пластини X), а горизонтально розташовані пластини (7) – у вертикальній площині (пластини Y). Відповідно напруга, що вимірюється, подається на вхід Y або X. При підключенні напруги U до вертикально відхиляючих пластин промінь зміщається на відстань y , згідно зі співвідношенням

$$y = \frac{lL}{2U_k d} U, \quad (8.1)$$

де l – довжина пластин; d – відстань між ними; L – відстань від пластин до екрана; U_k – прискорювальна різниця потенціалів.

Важливою характеристикою ЕПТ є її чутливість до напруги S , під якою розуміється величина, чисельно дорівнює зсуву променя на екрані ЕПТ при подачі напруги, що дорівнює одному вольту:

$$S = \frac{y}{U} = \frac{lL}{2U_k d}. \quad (8.2)$$

Чутливість до напруги ЕПТ по осях Х і Y різна.

Для спостереження зміни сигналу з часом на горизонтальну пару пластин подають пилоподібну напругу від наявного в осцилографі генератора розгорнення – *вмикають розгортку*. Щоб зображення залежності напруги, яку досліджують, від часу було стійким на екрані, необхідно погодити періоди пилоподібної напруги і тієї, яку досліджують, для чого використовують ручку «синхронізація».

Виконання роботи

Усі осцилограми, що спостерігаються, замальовувати в робочому зошиті.

Опис установки і хід роботи

1. Вимір напруги

А) Зібрати схему (рис. 8.2), використавши панель лабораторної роботи 1. Включити осцилограф, відключити розгорнення й установити світну точку в центрі екрана. Подати на вхід Y *постійну напругу*. Виміряти величину напруги. Що відбувається зі зміною величини напруги U_y і її полярності? Записати в лабораторний журнал.

Б) Відключити напругу від входу Y і подати на вхід X. Повторити спостереження попереднього завдання.

В) Підключити дільник напруги $R'R_1$ до клем джерела *змінної напруги* $\sim U$ і подати сигнал на вхід X. Що спостерігається в цьому випадку? Записати в лабораторний журнал.

Г) Перемкнути змінну напругу з входу X на вхід Y. Що спостерігається в цьому випадку? Яке розходження між зображенням завдання А) і даного завдання?

Д) *Включити розгортку*. Подати постійну, а потім змінну напругу на вхід Y. Яке розходження між цими зображеннями?

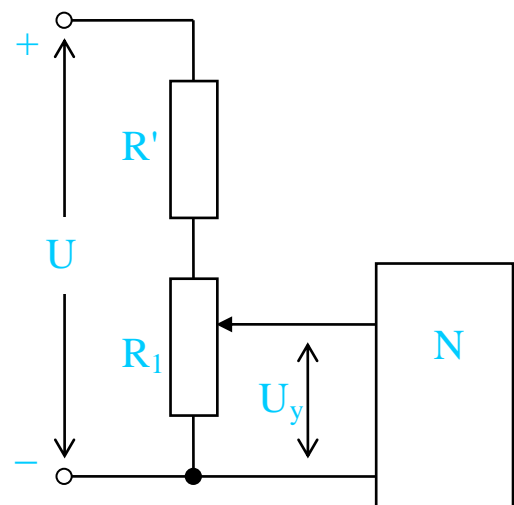


Рис. 8.2

Е) Виміряти величину змінної напруги, що подається на вхід Y, за допомогою осцилографа. Знайти амплітудне U_0 і ефективне U_{ef} значення напруг. $U_{ef} = U_0 / \sqrt{2}$.

Ж) Виміряти напругу U_v за допомогою цифрового вольтметра (В7–21). Яку напругу показує цей прилад – U_0 або U_{ef} ?

2. Вимір частоти

Подати на вхід Y змінну напругу – синусоїдальний сигнал від генератора.

Змінюючи сталу розгортки, одержати стійке зображення синусоїди (рис. 8.3). Визначити довжину L, що відповідає цілому числу періодів сигналу n . Тоді частота f визначається зі співвідношення

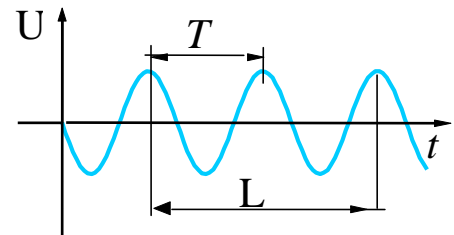


Рис. 8.3

$$f = \frac{n}{LT} . \quad (8.3)$$

3. Додавання коливань однакового напрямку з близькими частотами

При додаванні коливань із близькими частотами

$$x_1 = a \cos \omega t ,$$

$$x_2 = a \cos (\omega + \Delta \omega) t$$

результуюче коливання описується рівнянням

$$x = 2a \cos \frac{\Delta \omega}{2} t \cos \omega t . \quad (8.4)$$

Періодична зміна амплітуди результуючого коливання називається биттями, період яких

$$T = \frac{2\pi}{\Delta \omega} . \quad (8.5)$$

Для спостереження биттів зібрати схему (рис. 8.4). Як змішувач використовувати трансформатор, змонтований на панелі роботи.

А) Подати на обмотку 1 трансформатора сигнал частотою 150-500 Гц від звукового генератора. Одержати на екрані осцилографа стійке зображення синусоїди. Заміряти амплітуду сигналу.

Б) Відключити обмотку 1. Від *іншого* генератора подати сигнал на обмотку 2. Установити амплітуду сигналу, що дорівнює попередній.

В) Подати одночасно сигнали на обмотки 1 і 2. Плавню змінюючи частоту одного з генераторів, одержати биття. Визначити період биттів, знаючи постійну розгортки, а потім, використовуючи (8.5), різницю частот $\Delta\omega$.

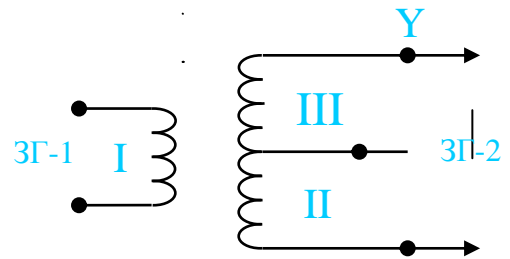


Рис. 8.4

4. Додавання взаємно перпендикулярних коливань і визначення різниці фаз

Нехай коливання уздовж осей X и Y описуються рівняннями:

$$\begin{aligned} x &= a \cos \omega t, \\ y &= b \cos (\omega t + \delta), \end{aligned}$$

тоді результуюче коливання, отримане при їх додаванні, описується рівнянням кривої другого порядку

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{2xy}{ab} \cos \delta = \sin^2 \delta. \quad (8.6)$$

При додаванні взаємно перпендикулярних коливань із кратними частотами на екрані спостерігаються так звані фігури Ліссажу. Якщо частота одного з сигналів невідома, її можна визначити за формулою

$$\frac{f_x}{f_y} = \frac{m}{n},$$

де m – число торкань фігурою Ліссажу вертикальної лінії; n – горизонтальної.

Аналізуючи фігури Ліссажу, можна визначити різницю фаз між двома сигналами однієї частоти. Якщо зображення являє собою діагональну пряму, то різниця фаз дорівнює 0 або π . Якщо зображення – еліпс, то

$$\delta = \arcsin (A / B),$$

де A – відстань між крапками перетинання еліпса з вертикаллю, B – максимальний розмір еліпса по вертикалі.

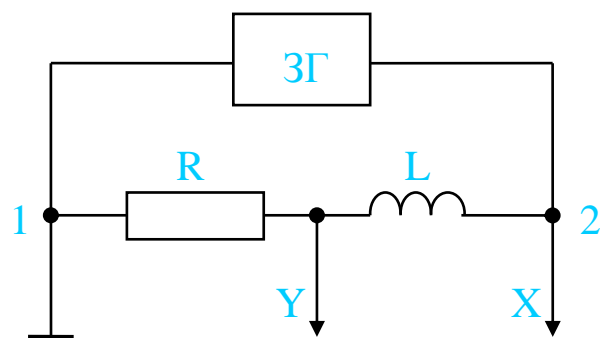


Рис. 8.5

А) Зібрати схему (рис. 8.5). У якості R використовувати опір $R_{ш}$ роботи 1, а в якості L – обмотки 2 і 3 трансформаторів, змонтованих на панелі. Установити частоту генератора $f = 300 - 500$ Гц. Виключити розгортку осцилографа. Зобразити результуючу криву. Визначити різницю фаз.

Б) Підключити на вхід Х сигнал від одного генератора, а на вхід Y від іншого. Відключити розгортку. Одержати фігури Ліссажу при співвідношенні частот

$$f_y = \frac{1}{2} f_x ; \quad f_y = f_x ; \quad f_y = \frac{3}{2} f_x ; \quad f_y = \frac{1}{3} f_x .$$

Переконалися в тім, що

$$\frac{f_x}{f_y} = \frac{m}{n} .$$

Контрольні питання

1. Для чого застосовується електронний осцилограф?
2. Опишіть будову та принцип роботи електронно-променевої трубки.
3. Як за допомогою ЕО можна виміряти параметри змінної напруги?
4. Поясніть виникнення биттів.
5. Як визначити частоту за методом фігур Ліссажу?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА

МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОЛІЗУ

Електричним струмом називають упорядкований (спрямований) рух заряджених частинок: електронів, іонів.

Електроліз – процес електрохімічного окислювання-відновлення, що відбувається на занурених в електроліт електродах, при проходженні електричного струму.

Електролітами називаються рідкі або тверді речовини, у яких у скільки-небудь помітних концентраціях присутні іони, здатні переміщатися й проводити електричний струм. У вузькому сенсі – розчини солей, кислот, лугів, які проводять електричний струм через наявність іонів, що утворюються в результаті електролітичної дисоціації.

Упорядкований рух іонів у рідинах відбувається в електричному полі, що створюється *електродами* – провідниками, з'єднаними з полюсами джерела струму. *Анодом* називається *позитивний* електрод, *катодом* – *негативний*.

Електричний струм в електролітах супроводжується явищем електролізу.

Мета роботи – визначити заряд електрона (e) методом електролізу розчину мідного купоросу (сірчаноокислої міді) CuSO_4 .

У водяному розчині молекули мідного купоросу (CuSO_4) дисоціюють на іони Cu^{2+} і SO_4^{2-} . Іони міді осаджуються на катоді й нейтралізуються, приєднуючи два електрони. Іони SO_4^{2-} рухаються до анода (рис. 9.1) і, якщо він виготовлений з міді, взаємодіють із ним, знову утворюючи сульфат міді CuSO_4 . Сумарний ефект полягає в тому, що чиста мідь переноситься з анода на катод без зменшення концентрації сульфату міді в розчині. У результаті катод покривається міддю, а з анода мідь поступово переходить у розчин.

В 1874 р. ірландський фізик Дж. Стоней увів поняття елементарного електричного заряду й оцінив його величину, використовуючи метод електролізу. В основі цього методу лежать закони електролізу, відкриті Фарадеєм. Фарадей експериментально встановив: *маса речовини m , що виділяється на електроді за час t при проходженні електричного струму через електроліт, пропорційна силі струму I і часу t :*

$$m = kIt, \quad (9.1)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від природи речовини й називається *електрохімічним еквівалентом речовини*.

$$k = \frac{1}{eN_A} \frac{M}{n}, \quad (9.2)$$

де e – заряд електрона;

$N_A = 6.023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ – число Авогадро;

M – молярна маса речовини;

n – валентність речовини.

Підставляючи значення k в (9.1), одержимо:

$$k = \frac{M}{eN_A n} \cdot It. \quad (9.3)$$

З (9.3) знайдемо заряд електрона:

$$e = \frac{MIt}{mN_A n} \quad (9.4)$$

Для міді $M = 0,064$ кг/моль, $n=2$.

Виконання роботи

Опис лабораторної установки

Схема лабораторної установки дана на рисунку 9.1. На схемі показані: вихідні клеми (+,-) регульованого джерела постійного струму, амперметр А, посудина з водяним розчином CuSO_4 , позитивний мідний електрод – анод (Ан), негативний мідний електрод – катод (К).

За допомогою регулятора струму встановлюється певна сила струму. Маса речовини m , що осідає на електроді при електролізі, визначається за різницею мас сухого катода після електролізу й до електролізу. Час електролізу t вимірюється за допомогою годинника.

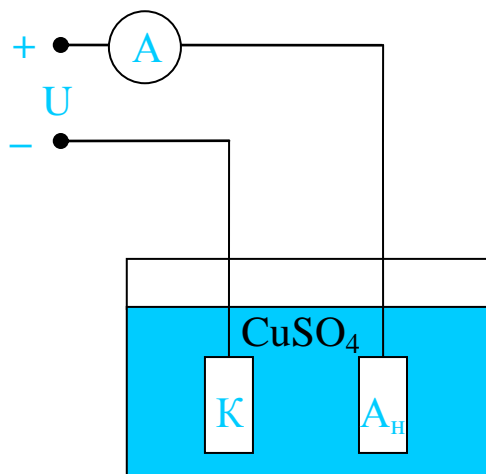


Рис. 9.1

Хід роботи

1. Зняти й висушити катод. Визначити його масу m_1 шляхом зважування.
2. Установити катод і анод у розчині CuSO_4 .
3. Включити джерело живлення й годинник. Установити за допомогою регулятора силу струму в ланцюзі. Підтримувати дану силу струму постійної протягом усього експерименту.
4. Через проміжок часу t , зазначений викладачем, відключити джерело живлення.
5. Зняти й висушити катод. Визначити його масу m_2 після електролізу.
6. Використовуючи співвідношення (9.4) і результати експерименту, знайти заряд електрона.

Контрольні питання

1. Що таке електричний струм? За яких умов речовина буде проводити струм?
2. Що називають електролізом? Які речовини називають електролітами?
3. Під дією яких сил іони рухаються в розчині під час електролізу?
4. Поясніть процес виділення міді на катоді при електролізі розчину сірчанокислої міді.
5. Сформулюйте закон Фарадея для електролізу.
6. Що таке електрохімічний еквівалент?
7. Як визначити заряд електрона, використовуючи метод електролізу?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №10

ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОЇДА Й ВИЗНАЧЕННЯ МАГНІТНОЇ СТАЛОЇ μ_0

Мета роботи – визначити магнітну індукцію поля, створеного довгим соленоїдом, її залежність від сили струму і магнітну сталу μ_0 .

Електричні струми взаємодіють між собою. Наприклад, два тонких прямолінійних паралельних провідника, по яких течуть струми (їх називають прямими струмами), притягуються один до одного, якщо струми в них мають однаковий напрямок, і відштовхуються, якщо струми протилежні.

Взаємодія струмів здійснюється через поле, що називають магнітним. Інакше кажучи, усякі заряди, що рухаються (електричні струми), збуджують у навколишньому просторі магнітне поле. Нерухомі в даній системі відліку заряди магнітне поле не створюють.

Магнітне поле проявляється в тому, що на *заряди, що рухаються* в ньому (струми), діють сили. Магнітне поле, на відміну від електричного, не діє на нерухомі заряди. Виявити магнітне поле можна за його силовою дією на заряджені частки, що рухаються, струми, намагнічені тіла (магнітну стрілку).

Основною характеристикою магнітного поля є вектор магнітної індукції \vec{B} . Для магнітних полів, як і для електричних, справедливий принцип суперпозиції: магнітна індукція поля \vec{B} , створеного декількома струмами, дорівнює векторній сумі індукцій \vec{B} полів кожного зі струмів окремо:

$$\vec{B} = \sum^N \vec{B}_i, \quad (10.1)$$

де N – число струмів.

Одиницею магнітної індукції у СІ є тесла (Тл).

Магнітне поле можна зобразити графічно за допомогою ліній магнітної індукції: дотичні до них показують напрямок вектора \vec{B} , а його модуль дорівнює числу ліній, що проходять через одиничну перпендикулярну до них площадку. Лінії магнітної індукції завжди замкнені, вони не мають початку й кінця – такі поля називають *вихровими*.

Напрямок ліній магнітної індукції визначається правилом правого гвинта (якщо поступальний рух правого гвинта збігається з напрямком струму, то напрямок обертання голівки гвинта вкаже напрямок ліній магнітної індукції).

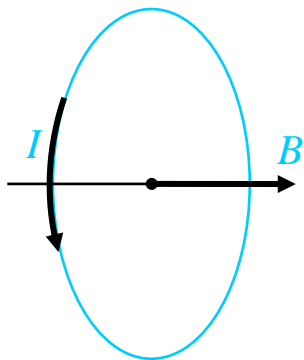


Рис. 10.1

Для вивчення магнітного поля можна взяти плоский замкнений контур зі струмом і помістити його в точку поля, що досліджується. Магнітне поле орієнтує такий вільний контур зі струмом (як і магнітну стрілку) певним чином, а саме: нормаль до площадки, обмеженої контуром, установлюється паралельно вектору магнітної індукції (рис 10.1).

Досліди з вивчення магнітних полів, створених струмами, що течуть по провідниках різної форми, показали, що:

- 1) у всіх випадках індукція \vec{B} магнітного поля пропорційна силі струму I ;
- 2) магнітна індукція залежить від форми та розмірів провідника зі струмом;
- 3) магнітна індукція \vec{B} у довільній точці поля залежить від розташування цієї точки відносно провідника зі струмом.

Біо, Савар і Лаплас узагальнили досвіди й одержали закон, що дозволяє обчислити індукцію в кожній точці поля, що створюється струмом, який тече вздовж провідника будь-якої форми:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{l} \vec{r}]}{r^3}, \quad (10.2)$$

де I – сила струму;

$I d\vec{l}$ – вектор, що збігається з елементарною ділянкою провідника довжини dl і спрямований по напрямку струму (його називають елементом струму);

\vec{r} – вектор, проведений від елемента струму $I d\vec{l}$ в ту точку, у якій визначається індукція $d\vec{B}$; r – модуль цього вектора.

Напрямок вектора $d\vec{B}$ знаходять за правилом правого гвинта.

Для розрахунку магнітних полів використовують також *теорему про циркуляцію* вектора індукції \vec{B} , що для вакууму формулюється так: циркуляція вектора індукції магнітного поля за довільним замкненим контуром дорівнює добутку магнітної сталої μ_0 на алгебраїчну суму N струмів, що охоплюються цим контуром, тобто

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_{k=1}^N I_k . \quad (10.3)$$

Застосуємо теорему про циркуляцію вектора \vec{B} для визначення магнітного поля усередині соленоїда.

Нехай струм I тече по провіднику, намотаному на поверхню циліндра. Такий обтічний струмом циліндр називають соленоїдом. На рисунку 10.2 зображений соленоїд у розрізі, кружки – перерізи витків дроту, по якому тече струм. Нехай на одиницю довжини соленоїда доводиться n витків провідника. Якщо крок гвинтової лінії (відстань між двома прилеглими витками) досить малий, то кожний виток соленоїда можна приблизно замінити замкненим витком. Досвід показує, що чим довший соленоїд, тим менша індукція B зовні. Для нескінченно довгого соленоїда ($l \gg r$, l – довжина соленоїда, r – радіус витка), індукція зовні соленоїда відсутня взагалі, а усередині соленоїда лінії індукції спрямовані уздовж його осі – поле є однорідним (рис. 10.2).

З огляду на те, що усередині соленоїда $B = \text{const}$, з (10.3) одержимо вираз для магнітного поля усередині соленоїда:

$$B = \frac{\mu_0 N I}{l} = \mu_0 n I . \quad (10.4)$$

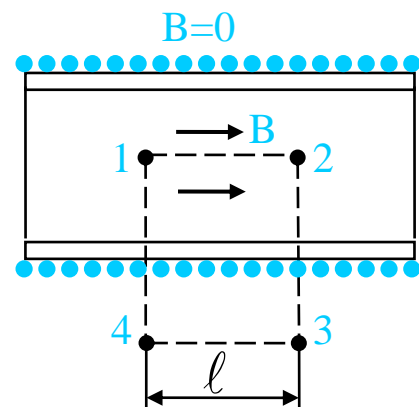


Рис. 10.2

Висновок отриманого результату даний у доповненні.

Як відзначалося, експериментально виміряти магнітну індукцію можна за впливом магнітного поля на розміщений у ньому провідник зі струмом (зонд). У даній роботі зонд реагує на магнітне поле завдяки *явищу електромагнітної індукції*, що було відкрито М. Фарадеєм. Фарадей виявив, що в замкненому провідному контурі, який не містить джерела струму, при зміні *магнітного потоку* через поверхню, обмежену контуром, *виникає електричний струм*. Цей струм назвали індукційним, а саме явище – електромагнітною індукцією. Поява електричного струму свідчить про виникнення електрорушійної сили (ЕРС), її називають ЕРС індукції.

Магнітним потоком Φ через поверхню площі S називають величину, рівну добутку модуля вектора магнітної індукції \vec{B} на площу S і на косинус кута φ між вектором \vec{B} і зовнішньою нормаллю \vec{n} до поверхні

$$\Phi = BS \cos \varphi . \quad (10.5)$$

Одиниця магнітного потоку – вебер ($1\text{Вб} = 1\text{Тл } 1\text{м}^2$).

Закон електромагнітної індукції можна сформулювати так:

ЕРС індукції у замкненому провідному контурі пропорційна швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, що спирається на даний контур

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} . \quad (10.6)$$

Знак мінус у цій формулі відбиває відповідність напрямку індукційного струму правилу Ленца. Формула (10.6) справедлива для всіх можливих випадків зміни магнітного потоку. При зміні магнітного потоку в котушці, що складається з N однакових витків, загальна ЕРС індукції у N разів більше ЕРС індукції в одиночному контурі, тобто:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} . \quad (10.7)$$

Природа ЕРС індукції була розкрита Максвеллом. Він показав, що будь-яке змінне в часі магнітне поле збуджує у навколишньому просторі електричне поле. Це поле і є причиною появи в провіднику індукційного струму. Наявність провідника лише допомагає виявити це електричне поле. Електричне поле, викликане змінним магнітним полем, не пов'язане з зарядами та має замкнені лінії напруженості вектора \vec{E} , тобто є вихровим (на відміну від електростатичного поля, створеного зарядами).

З (10.5) випливає, що оскільки магнітна індукція пропорційна току, то й потік Φ також буде пропорційний силі струму I

$$\Phi = LI, \quad (10.8)$$

де L – індуктивність контуру – величина, що залежить від форми контуру, його розмірів і магнітних властивостей середовища (μ).
Одиниця індуктивності – генрі ($\text{Гн} = \text{В} \cdot \text{с} / \text{А}$).

Індуктивність L соленоїда, довжина якого l , а число витків N , кожний з яких обмежує площу S , що має сердечник (поміщений усередину соленоїда феромагнетик), з магнітною μ проникністю дорівнює

$$L = \mu_0 \mu n^2 V, \quad (10.9)$$

де V – об'єм соленоїда, $V = lS$;

n – число витків, що доводяться на одиницю довжини соленоїда – щільність витків.

Якщо по соленоїду пропускати змінний струм, то створене ним усередині соленоїда магнітне поле також буде змінним

$$B = B_m \cos \omega t.$$

Якщо тепер помістити в нього замкнений провідний контур – зонд – у вигляді маленької котушки, то в цій котушці буде виникати ЕРС індукції, яку можна виміряти вольтметром або осцилографом

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 S \frac{dB}{dt}, \\ \varepsilon &= N_1 S \omega B_m \sin \omega t \end{aligned} \quad (10.10)$$

де ω – циклічна частота; S – площа перерізу котушки; число витків котушки N_1 .

При вимірі напруги приладом з більшим вхідним опором можна вважати, що вимірювана напруга U дорівнює ε , тобто

$$\varepsilon = U = U_m \sin \omega t.$$

Тоді з формули (10.10) за умови, що $\omega = 2\pi\nu$, маємо:

$$B_m = \frac{U_m}{N_1 S 2\pi\nu}, \quad (10.11)$$

де U_m – амплітудне значення напруги, $\nu = 50$ Гц.

Виконання роботи

Опис лабораторної установки

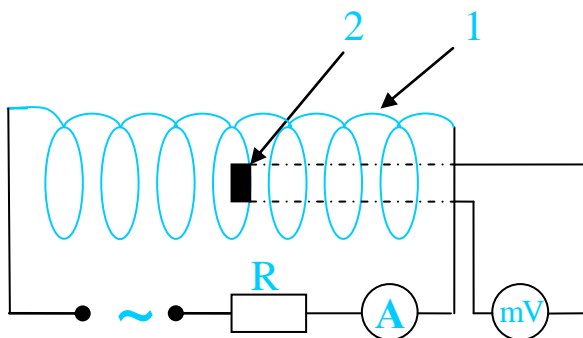


Рис. 10.3

Схема установки представлена на рисунку 10.3. Соленоїд (1) має довжину l , діаметр D і число витків N . Для виміру магнітної індукції використовується зонд (2), що представляє собою котушку діаметром d , а число її витків N_1 .

Хід роботи

1. Зняти залежність індукції B у центрі соленоїда від сили струму I , що протікає по обмотці соленоїда. Для цього встановити зонд у центрі соленоїда. Змінюючи силу струму I , провести виміри значень напруги U_{ef} за допомогою мілівольтметра (mV). Дані вимірів сили струму й напруги занести у таблицю.

Використовуючи формулу (10.11), розрахувати індукцію магнітного поля в центрі соленоїда залежно від сили струму I ($U_m = U_{ef} \sqrt{2}$). Результати розрахунків занесіть у таблицю. Побудуйте залежність $B=B(I)$.

2. З отриманої залежності $B=B(I)$ (завдання 1) визначити коефіцієнт пропорційності α між B і nI :

$$\alpha = \frac{B}{nI},$$

порівняти отримане значення α зі сталою μ_0 (див. формулу 10.4).

3. Зняти залежність індукції $B(l)$ соленоїда від положення зонда на осі соленоїда.

Установити певне значення струму в ланцюзі. Переміщаючи зонд уздовж осі соленоїда провести виміри напруги U_{ef} за допомогою мілівольтметра. Використовуючи формули (10.4) і (10.11), визначити індукцію магнітного поля для всіх положень зонда на осі соленоїда.

Результати вимірів і розрахунків занести до таблиці. Побудувати графік залежності $B=B(l)$. Зробити висновок про однорідність поля усередині соленоїда.

Доповнення

Розрахунок індукції магнітного поля, створеного довгим соленоїдом

Для визначення магнітної індукції B поля, створеного струмом, що протікає по обмотці соленоїда, скористаємося теоремою про циркуляцію (10.3). Ще раз звернемо увагу, що магнітне поле поза нескінченно довгим соленоїдом дорівнює нулю, а усередині соленоїда воно є однорідним – лінії магнітної індукції паралельні (рис.10.2).

Згідно з (10.3) циркуляція вектора B дорівнює інтегралу по замкненому контуру, у якості якого оберемо контур 1-2-3-4 на рисунку 10.2. Тоді інтеграл по замкненому контуру розпадається на суму інтегралів по боках цього контуру. Інтеграл на ділянці 3-4 дорівнює нулю, оскільки $B=0$ у цій області. Інтеграли на ділянках 2-3 і 4-1 також дорівнюють нулю. Дійсно, під інтегралом знаходиться скалярний добуток векторів B і $d\vec{l}$

$$(Bd\vec{l}) = Bdl \cos \alpha ,$$

де α – кут між B і $d\vec{l}$, косинус якого на зазначених ділянках дорівнює нулю, оскільки вектори B і $d\vec{l}$ перпендикулярні. На ділянці 1-2 вектори B і $d\vec{l}$ паралельні, тому $\cos \alpha = 1$ й $(Bd\vec{l}) = Bdl$. У такий спосіб остаточно маємо, що циркуляція вектора B за обраним контуром дорівнює:

$$\oint \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 B l , \quad (10.23)$$

де l – довжина сторони 1-2.

У правій частині формули (10.3) знаходиться сума струмів, охоплених контуром, тобто в нашому випадку – число витків, що укладаються на довжині l . Якщо щільність витків дорівнює n і по кожному з них тече струм I , то сума струмів буде дорівнює nIl .

Тоді (10.23) можна переписати у вигляді

$$Bl = \mu_0 nIl . \quad (10.24)$$

Звідки остаточно одержуємо значення вектора магнітної індукції поля соленоїда

$$B = \mu_0 nI . \quad (10.25)$$

Контрольні питання

1. Опишіть схему установки та порядок виконання роботи.
2. Як створюються та виявляються магнітні поля? Індукція магнітного поля, одиниці виміру. Лінії магнітної індукції. Принцип суперпозиції магнітних полів.
3. Дайте визначення явищу електромагнітної індукції.

4. * Виведіть формулу для індукції магнітного поля нескінченно довгого соленоїда.
5. Дайте визначення магнітного потоку. Сформулюйте закон електромагнітної індукції. Як спрямований індукційний струм?
6. * Виведіть формулу (10.11).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11

ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

Мета роботи – ознайомлення з елементами земного магнетизму та вимір горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі за допомогою тангенс-гальванометра.

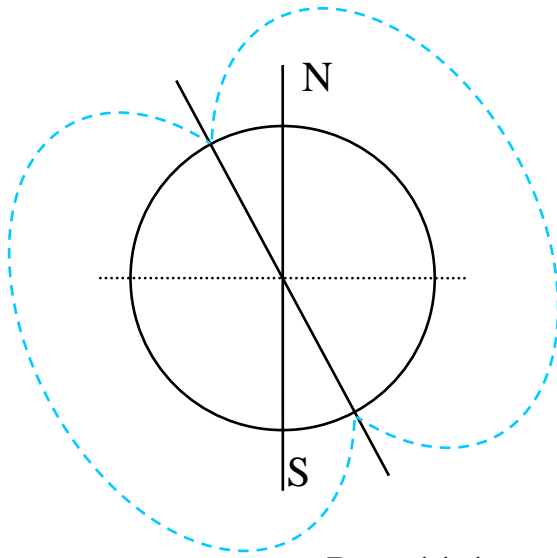


Рис. 11.1

Земля являє собою гігантський магніт. Магнітна вісь нахилена щодо географічної, й координати магнітних полюсів не збігаються з географічними.

Сучасні теорії не дають вичерпного опису природи земного магнетизму, проте, знання розподілу земного магнітного поля та його аномалій має велике значення

для рішення ряду географічних і геологічних проблем. Неоднорідності магнітного поля, що спостерігаються на поверхні Землі, дозволяють робити розвідку корисних копалин, виявляти скупчення магнітних руд. Оскільки поклади феромагнітних порід часто пов'язані з родовищами інших корисних копалин, магнітна розвідка застосовується для пошуку нафти, вугілля, поліметалевих руд.

Основними методами у вивченні магнітного поля Землі є безпосередні виміри характеристик земного магнетизму (магнітні зйомки), які робляться в постійно діючих магнітних обсерваторіях, що перебувають у різних пунктах земної кулі.

Характеристикою магнітного поля Землі, як і всякого магнітного поля, слугує індукція поля \vec{B} . Лінії індукції магнітного поля Землі схематично зображені на рисунку 11.1. Вектор магнітної індукції спрямований за дотичною до силової лінії у кожній точці. Для розкладання вектора \vec{B} на складові зазвичай приймають прямокутну систему координат, у якій одну з осей (x) орієнтують за напрямком географічного меридіана, а другу (y) за напрямком паралелі, при цьому позитивним вважається напрямок осі (x) до півночі, а осі (y) до сходу. Третя вісь (z) у такому випадку набуває вертикального положення, і напрямок її обирають зверху вниз (рис. 11.2).

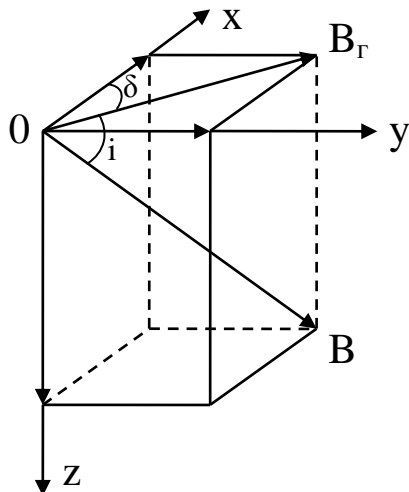


Рис. 11.2

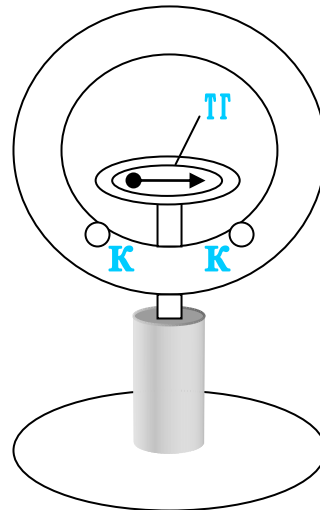


Рис. 11.3

Розташуємо початок координат у точці, де відбувається спостереження над вектором індукції магнітного поля Землі, тоді вектор \vec{B} займе стосовно обраної системи координат деяке положення (рис.11.2). Проекція \vec{B} на горизонтальну площину називається горизонтальною складовою й позначається B_H . Кут i між B_H і \vec{B} називається магнітним нахиленням.

Вертикальна площина zOB , у якій лежить вектор \vec{B} , називається площиною магнітного меридіана. Кут між площиною географічного та магнітного меридіанів δ називається магнітним схилом. Величини B_H , δ та i є елементами земного магнетизму.

Опис установки

Основною частиною лабораторної установки є тангенс-гальванометр (ТГ), що представляє собою бусоль (компас із лімбом, розділеним на градуси), укріплену усередині пласкої вертикальної котушки (рис.11.3). Якщо розміри магнітної стрілки малі в порівнянні з діаметром витків котушки, то можна вважати, що стрілка встановлена в її центрі. Котушка складається з декількох витків ізоляованого дроту, кінці якого виведені на клеми (КК), через які тангенс-гальванометр підключається до електричного кола.

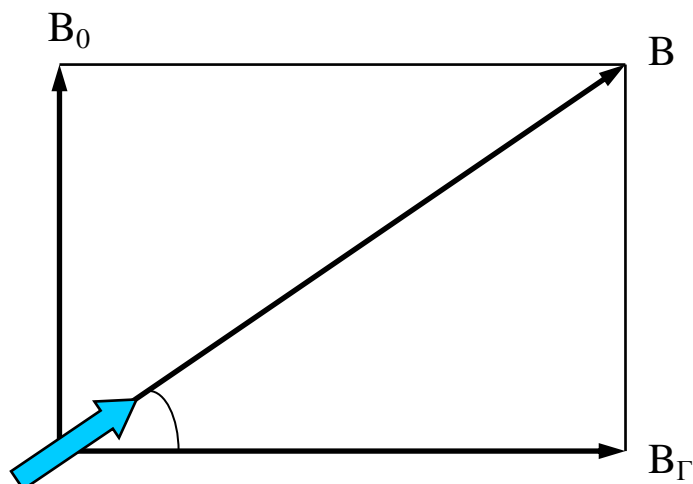


Рис. 11.4

Експериментальний метод визначення горизонтальної складової індукції земного магнітного поля $B_Г$ заснований на додаванні дії на магнітну стрілку, що вільно обертається на вертикальній опорі (компас), магнітного поля Землі й магнітного поля кругового струму, індукція якого B_0 відома.

Під дією тільки магнітного поля Землі стрілка компаса встановиться уздовж напрямку $B_Г$ (рис. 11.4). Якщо в ланцюзі котушки пропустити струм I , то виникає магнітне поле, індукція якого в центрі кільця перпендикулярна до площини котушки, а чисельне значення визначається за формулою

$$B_0 = \mu_0 \frac{I}{2r} n , \quad (11.1)$$

де r – радіус витка котушки; n – число витків у ній.

При цьому магнітна стрілка обернеться на кут α і встановиться за напрямком вектора індукції результуючого поля $\vec{B} = \vec{B}_Г + \vec{B}_0$.

Тоді

$$B_0 = B_Г \operatorname{tg} \alpha \quad (11.2)$$

Таким чином, при включенні поля B_0 стрілка відхиляється на деякий кут α , який можна виміряти. Знаючи силу струму й параметри котушки, величину B_0 розраховують за формулою (11.1), а $B_Г$ можна обчислити за формулою (11.3), що виходить після підстановки (11.2) в (11.1)

$$B_A = \frac{\mu_0 I n}{2r \cdot \operatorname{tg} \alpha} . \quad (11.3)$$

Електрична схема установки представлена на рисунку 11.5, де ТГ – тангенс-гальванометр, ε – джерело постійного струму, А – амперметр, R – реостат для регулювання сили струму в ланцюзі.

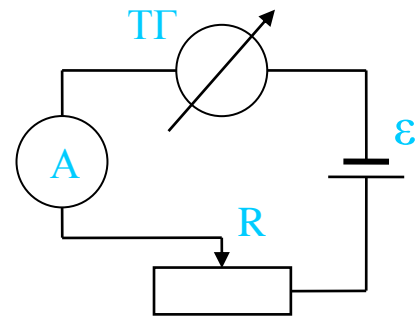


Рис. 11.5

Виконання роботи

Хід роботи

1. Повертаючи опору тангенс-гальванометра, установити площину кругового струму за напрямком магнітної стрілки. У цьому випадку площина кругового струму збігається з магнітним меридіаном.

2. Включити струм. При проходженні струму I буде створене магнітне поле B_0 , спрямоване по осі кругового струму перпендикулярно магнітному полю Землі B_T . Магнітна стрілка компаса повернеться в горизонтальній площині на кут α і встановиться уздовж рівнодіючої B_T цих двох полів.

3. Зняти залежність кута повороту стрілки від сили струму. Змінивши напрямок струму на протилежний, повторити вимір кута. Дані занести в таблицю.

№	I, A	α	$\operatorname{tg} \alpha$	B_T
---	--------	----------	----------------------------	-------

4. Обчислити значення B_T за формулою (11.3) для кожної величини сили струму й відповідного значення α .

5. Знайти середнє значення B_T і абсолютну похибку результату. Обчислити відносну похибку результату.

Контрольні питання

1. Який вигляд мають лінії магнітної індукції поля Землі? Як спрямований вектор індукції магнітного поля відносно даної лінії?
2. Які елементи земного магнетизму ви знаєте?
3. Розрахуйте індукцію магнітного поля кругового струму в центрі кільця.

4. Які устрій і принцип дії тангенс-гальванометра?
5. Чому варто орієнтувати площину кругового струму в напрямку магнітного меридіана?

ОПТИКА

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ СВІТЛА ПРИ СПОСТЕРЕЖЕННІ КІЛЕЦЬ НЬЮТОНА

Відповідно до хвильової теорії, *світло являє собою електромагнітні хвилі*, а саме, коливання взаємопов'язаних векторів напруженості електричного та магнітного полів, що поширюються в просторі.

Хвилі можуть взаємно підсилювати або послаблювати одна одну при накладанні, тобто відбувається перерозподіл світлового потоку в просторі або *інтерференція*. У результаті в одних місцях простору виникають максимуми, а в інших – мінімуми інтенсивності світла. Необхідною умовою інтерференції хвиль є їхня когерентність, тобто рівність їхніх частот і сталість різниці фаз у часі.

Основні труднощі в здійсненні явища інтерференції світла полягають в одержанні когерентних світлових хвиль. Світло, випромінене звичайними лампами, сонцем і іншими природними джерелами, не є когерентним. Якщо є кілька звичайних джерел світла, то інтенсивність світла в кожній точці простору дорівнює сумі інтенсивностей, створених у цій точці кожним джерелом окремо. Якщо, однак, джерела когерентні, то положення міняється. Накладання когерентних хвиль приведе до того, що в області накладання буде спостерігатися інтерференційна картина – у деяких точках будуть спостерігатися посилення інтенсивності – максимуми, а в інших точках – мінімуми. Чи буде в деякій точці спостерігатися мінімум або максимум, залежить від різниці ходу хвиль. Різницю $\Delta = n_2 s_2 - n_1 s_1$ називають *оптичною різницею ходу хвиль*. Тут n_1 і n_2 – показники заломлення середовищ, у яких поширюється кожна хвиля; s_1 і s_2 відстані (геометричні шляхи), пройдені відповідно першою й другою хвилями до точки спостереження. Якщо на оптичній різниці ходу укладається ціле число довжин хвиль (або, що те ж саме, *парне* число довжин напівхвиль), тобто

$$\Delta = m\lambda = 2m\frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (12.1)$$

тоді результуюче коливання має найбільшу амплітуду. У таких точках простору спостерігають *максимуми* інтенсивності. У точках простору, для яких

$$\Delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots; \quad (12.2)$$

тобто на оптичній різниці ходу укладається *непарне* число довжин напівхвиль, спостерігають *мінімуми* інтенсивності. Таким чином, внаслідок інтерференції енергія результуючого коливального процесу розподіляється в просторі нерівномірно. Сукупність максимумів, що чергуються, з мінімумами інтенсивності утворить інтерференційну картину. Ціле число m називають *порядком* максимуму та мінімуму.

Різниця фаз коливань δ , що створюються у деякій точці простору двома плоскими монохроматичними хвилями, які поширюються в середовищах з різною оптичною густиною, *пов'язана з різницею ходу* співвідношенням

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_2s_2 - n_1s_1) = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta, \quad (12.3)$$

де λ – довжина хвилі у вакуумі.

У природних умовах інтерференційна картина може спостерігатися при додаванні хвиль від одного джерела, оптична різниця ходу яких обумовлена відбиттям від різних поверхонь прозорої плівки. Наприклад, райдужне інтерференційне фарбування спостерігається в мильних плівках, тонких плівках нафти або бензину на поверхні води та ін.

У тонких плівках змінної товщини локалізація інтерференційної картини виникає на поверхні плівки, при цьому всі точки кожної інтерференційної смуги відповідають певній товщині плівки; звідси назва інтерференційної картини – смуги рівної товщини.

Випадком такого роду інтерференції є кільця Ньютона. У роботі вони спостерігаються при відбитті світла від плоско паралельної скляної пластини П і плоско опуклої лінзи Л з великим радіусом кривизни R , що торкаються (рис. 12.1). Роль тонкої плівки грає повітряний прошарок між пластинкою й лінзою, що поступово товщає від точки їхнього зіткнення до країв. В експерименті світло на цю систему направляють вертикально зверху (на рисунку падаючий на лінзу промінь спрямований на лінзу не вертикально, а під кутом для наочності; не зображене заломлення променів на границях розподілу

середовищ повітря-скло). Кожний промінь, дійшовши до верхньої границі повітряного прошарку (нижньої поверхні лінзи Л), частково відіб'ється (промінь 1), частково пройде крізь нього. Дійшовши до

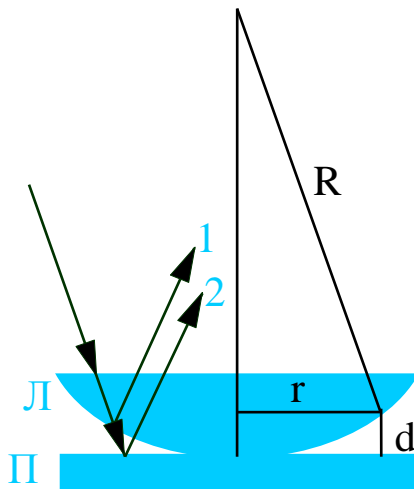


Рис. 12.1

нижньої границі прошарку (верхньої поверхні пластини П), промінь знову частково відіб'ється від неї (промінь 2). Відбиття від інших поверхонь не розглядаються, оскільки через велику товщину пластини й лінзи інтерференція для них не спостерігається.

Промені 1 і 2, що утворилися з того самого падаючого променя при відбитті від верхньої і нижньої границь тонкого повітряного прошарку, є когерентними й при вертикальному падінні світла йдуть в

одному напрямку, оскільки кут, утворений повітряним «клином», малий.

Оптична різниця ходу променів 1 і 2 визначається подвоєною товщиною повітряного прошарку d , яку другий промінь проходить у прямому й зворотному напрямках, а крім того, втратою половини довжини хвилі при відбитті від скляної пластини на нижній границі повітряного прошарку.

Таким чином, з огляду на те, що для повітря показник заломлення n близький до 1, оптична різниця ходу променів 1 і 2 буде дорівнювати

$$\Delta = 2d - \frac{\lambda}{2} . \quad (12.4)$$

Додаток $\lambda/2$ відображає зміну фази хвилі на π при відбитті від оптично більш щільного середовища («втрату на півхвилі»). Видно, що оптична різниця ходу для хвиль із однаковою довжиною λ визначається тільки товщиною повітряного прошарку d , тому вона (різниця) однакова для всіх хвиль, відбитих на однаковій відстані від точки дотику лінзи й пластини (рис. 12.1). Внаслідок цього інтерференційна картина має вигляд концентричних кілець із центром у точці дотику пластинки й лінзи. У центрі картини, де $d \approx 0$, спостерігають темну пляму, що відповідає різниці ходу, яка дорівнює $\lambda/2$. Якщо падаюче світло не стовідсотково монохроматичне, а має

спектральний інтервал $\Delta \lambda$, кількість спостерігаємих інтерференційних кілець, що спостерігаються, буде мати границю (що впливає з умови часової когерентності)

$$m = \lambda / \Delta \lambda . \quad (12.5)$$

Радіуси темних і світлих кілець визначаються з умов інтерференції.

Для тих товщин d , для яких

$$2d - \frac{\lambda}{2} = 2m \frac{\lambda}{2} , \quad (12.6)$$

виконується умова максимуму (12.1) і спостерігається світле кільце. Для тих товщин, для яких

$$2d - \frac{\lambda}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} , \quad (12.7)$$

виконується умова мінімуму (12.2) і спостерігається темне кільце.

Товщину повітряного прошарку можна зв'язати з радіусом кривизни лінзи та радіусом відповідного кільця Ньютона. З рисунка 12.1 видно, що

$$R^2 = (R - d)^2 + r^2 = R^2 - 2Rd + d^2 + r^2 .$$

Оскільки d мало, $d^2 \ll 2Rd$, їм можна зневажити, тоді

$$d = \frac{r^2}{2R} . \quad (12.8)$$

Підставляючи (12.8) в (12.4), одержимо для радіусів темних кілець:

$$r_m = \sqrt{mR\lambda} , \quad m=1,2,3,\dots$$

Вимірявши радіус темного кільця з відповідним номером m та знаючи довжину хвилі падаючого світла λ , можна визначити радіус кривизни лінзи:

$$R = \frac{r_m^2}{m\lambda} .$$

Результат буде більш точним, якщо виміряти радіус не одного, а двох темних (або світлих) кілець. У цьому випадку радіус кривизни лінзи визначається за формулою

$$R = \frac{r_{m1}^2 - r_{m2}^2}{(m_1 - m_2)\lambda} , \quad (12.9)$$

де r_{m1} і r_{m2} – радіуси, m_1 і m_2 відповідні номери кілець.

Виконання роботи

Мета роботи

У даній роботі потрібно визначити радіус кривизни скляної лінзи R , довжину хвилі світла λ , що пропускається світлофільтром, і товщину повітряного зазору d .

Опис установки

Джерелом світла служить звичайна лампа розжарювання, світло від якої пропускається через світлофільтр. Інтерференційна картина – кільця Ньютона – досліджується за допомогою мікроскопа. Світло від лампи, пройшовши через світлофільтр і діафрагму, потрапляє на напівпрозоре дзеркало, укріплене перед об'єктивом мікроскопа. Збільшення мікроскопа та положення дзеркала за допомогою спеціальних гвинтів підбираються таким чином, щоб інтерференційна картина повністю містилася в полі зору мікроскопа і яскравість кілець, що утворюються, була максимальною.

Хід роботи

1. Виміряти діаметри декількох темних кілець для червоного світлофільтра за допомогою мікроскопа.
2. Знаючи довжину хвилі, що пропускається червоним світлофільтром ($\lambda=656\text{нм}$, $1\text{нм} = 10^{-9}\text{м}$) і, використовуючи співвідношення (12.9), визначити радіус кривизни лінзи R .
3. Скориставшись співвідношенням (12.8), обчислити товщину повітряного зазору в місці, де спостерігається кільце з номером m .
4. За максимальною кількістю темних (або світлих) кілець визначити спектральний діапазон світла, пропущеного світлофільтром за формулою (12.5).

Контрольні питання

1. У чому полягає явище інтерференції?
2. Які хвилі називаються когерентними?
3. За яких умов спостерігаються мінімуми та максимуми інтерференційної картини?
4. Поясніть виникнення кілець Ньютона.
5. Наведіть приклади інтерференції у тонких плівках, що спостерігаються в природі. Поясніть ці явища.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 13

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ХВИЛІ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЛАЗЕРА ЗА ДОПОМОГОЮ ДИФРАКЦІЙНОЇ ҐРАТКИ

Характерною рисою поширення будь-яких хвиль є їхня здатність огинати перешкоди. Сукупність явищ, які спостерігаються при поширенні хвиль у середовищі з різкими неоднорідностями, називають *дифракцією*.

Дифракцією світла пояснюється відхилення від законів геометричної оптики. Наприклад, поблизу границі геометричної тіні з'являються світлі й темні смуги – дифракційна картина – результат перерозподілу світлового потоку в просторі.

Розрахунок інтенсивності дифракційної картини здійснюють на основі принципу Гюйгенса-Френеля: малі елементи хвильової поверхні є джерелами вторинних когерентних хвиль, амплітуди яких пропорційні площі елемента; тоді амплітуда коливань у будь-якій точці простору визначається інтерференцією таких вторинних хвиль.

Важливою для застосувань є дифракція світла на дифракційній ґратці.

Дифракційна ґратка – це пластинка з прозорого матеріалу, на яку нанесена велика кількість паралельних штрихів. Якщо пропускати монохроматичне світло через таку систему щілин, на екрані можна спостерігати дифракційну картину – яскраві максимуми, розділені темними проміжками – мінімумами.

Умова спостереження головних максимумів при нормальному падінні світла на дифракційну ґратку має вигляд

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda, \quad (13.1)$$

де d – період решітки – відстань між сусідніми щілинами; φ – кут відхилення променя від первісного напрямку (кут дифракції); λ – довжина хвилі падаючого на ґратку світла; $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ – порядок (номер) максимуму.

При падінні на ґратку білого світла відбувається його розкладання в спектр, оскільки відповідно до співвідношення (13.1), кожній довжині хвилі відповідає певний кут дифракції. Завдяки цьому дифракційну ґратку використовують як оптичний прилад для отримання спектрів. Слід мати на увазі, що кожному порядку k відповідає свій спектр, інтенсивність якого меншає з ростом k .

Виконання роботи

Опис установки

У роботі вивчення дифракції проводиться з використанням дифракційної решітки (ДР) і гелій-неонового лазера – джерела вузько спрямованого когерентного випромінювання (рис. 13.1).

Мета роботи – визначити довжину хвилі гелій-неонового лазера, а також розміри перешкод, на яких відбувається дифракція – період дифракційної ґратки (проміжок між серединами сусідніх щілин) і товщину нитки.

Хід роботи

1. За допомогою дифракційної ґратки визначити довжину хвилі лазерного випромінювання. Для цього, установивши ґратку на відстані l від екрана, одержати дифракційну картину й виміряти відстань x між сусідніми головними максимумами інтенсивності. За формулою (13.1) розрахувати довжину хвилі, що випромінюється лазером, вважаючи $\operatorname{tg} \varphi = \sin \varphi = x/l$, для $k=1$.

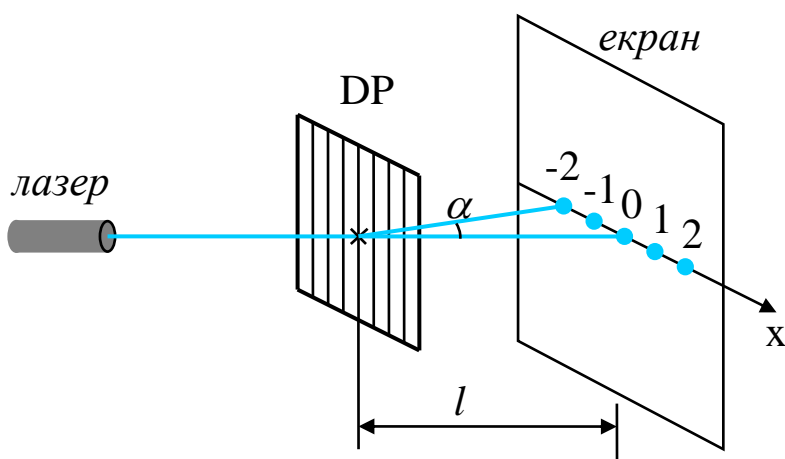


Рис. 13.1

2. Дифракція на двовимірній плоскій ґратці. Установити другу ґратку за першою, розташувавши її штрихи перпендикулярно до штрихів першої ґратки. Розрахувати період другої ґратки за відомою довжиною хвилі падаючого світла й обміряних відстаней x між максимумами на екрані за допомогою формули (13.1).

3. Виміряти діаметр тонкої нитки b . Замість дифракційної ґратки встановити тонку нитку і, змінюючи відстань між ниткою й екраном, підібрати таке положення нитки, щоб на екрані спостерігалася дифракція Фраунгофера з розмитим центральним максимумом, кутову ширину якого можна визначити за формулою

$$\sin \varphi = \frac{2\lambda}{b} .$$

Визначити b . Врахувати, що при малих кутах

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta x}{l} ,$$

де Δx – ширина центрального максимуму, l – відстань від нитки до екрана.

Контрольні питання

1. Що розуміють під дифракцією світла?
2. Поясніть суть принципу Гюйгенса-Френеля.
3. Як можна визначити довжину світлової хвилі за допомогою дифракційної ґратки?
4. Поясніть використання дифракційної ґратки як спектрального приладу.
5. Що таке лазер? Назвіть особливості лазерного випромінювання.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №14

РАДІАЦІЙНИЙ ТЕПЛООБМІН.

ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

Радіаційний теплообмін – процес передачі енергії від більш нагрітого тіла до менш нагрітого шляхом випромінювання та поглинання цими тілами електромагнітних хвиль (радіації). *Електромагнітна хвиля* – змінне електромагнітне поле, що поширюється в просторі. Інакше кажучи, в електромагнітній хвилі відбуваються коливання електричного (**Е**) і магнітного (**Н**) поля. Основні характеристики хвиль – довжина хвилі, частота, швидкість, інтенсивність (квадрат амплітуди).

Випромінювання тілами електромагнітних хвиль супроводжується втратою енергії й, отже, остиганням тіла. Якщо ж тіло, поглинаючи падаюче на нього випромінювання від навколишніх тіл, одержує кількість тепла, що компенсує збиток його енергії, то температура тіла буде постійною. Такий процес випромінювання називають *рівноважним*.

Охарактеризуємо процеси випромінювання та поглинання кількісно.

Величина, яка чисельно дорівнює потоку енергії dE_1 , що випромінюється з одиниці поверхні тіла, – *енергетична світимість*:

$$R = \frac{dE_1}{dS}. \quad (14.1)$$

Ця енергія, що випромінюється тілом, розподілена за довжинами хвиль – у якомусь діапазоні довжин хвиль λ випромінюється більше енергії, у якомусь менше. Тому вводять *випромінювальну здатність тіла* r_λ – енергетичну світимість у малому інтервалі довжин хвиль $d\lambda$.

Тоді

$$R = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda. \quad (14.2)$$

Поглинальна здатність тіла a_λ так само буде різною для електромагнітних хвиль із різною довжиною хвилі:

$$a_\lambda = \frac{dE_2}{dE}. \quad (14.3)$$

Поглинальна здатність показує, яка частка випромінювання, що падає на одиницю площі поверхні тіла в діапазоні $d\lambda$, поглинається їм в одиницю часу. Інша частина падаючого на тіло випромінювання розсіюється та відбивається, а також заломлюється (для прозорих тіл).

Випромінювальна й поглинальна здатності тіла залежать від частоти випромінювання (радіації), температури, хімічного складу й стану поверхні.

Тіло, що при будь-яких температурах поглинає усе падаюче на нього світло, називається *абсолютно чорним тілом*. Для нього, $a_\lambda = 1$. Для більшості тіл $a_\lambda < 1$.

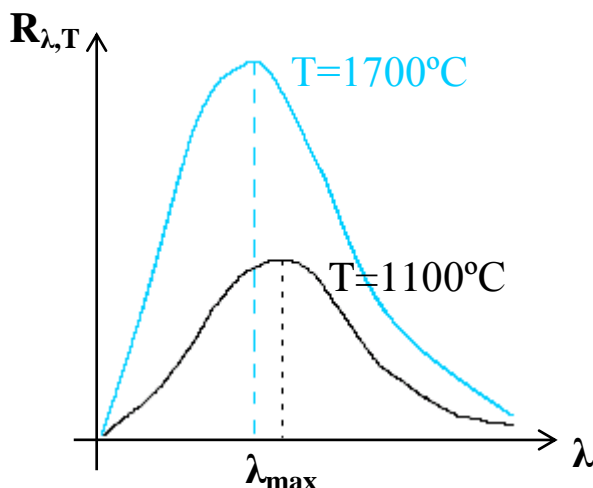


Рис. 14.1

Залежність випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла від довжини хвилі схематично наведена на рисунку 14.1.

М. Планком була висунута гіпотеза про те, що випромінювання електромагнітних хвиль здійснюється порціями енергії – квантами. Енергія кванта ε пов'язана з частотою ν електромагнітної хвилі $\varepsilon = h\nu$.

На основі цієї гіпотези вдалося описати залежність випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла від довжини хвилі аналітично.

Формула Планка:

$$r_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1}, \quad (14.4)$$

де k – стала Больцмана, h – стала Планка.

Особливості цієї залежності відбиті в *законах випромінювання абсолютно чорного тіла*.

Закон зсуву Віна. Довжина хвилі λ_{\max} , що відповідає максимуму випромінювальної здатності r_{λ} , обернено пропорційна абсолютній температурі тіла (рис 14.1):

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (14.5)$$

де b – стала Віна.

Це означає, що для кімнатних температур ($T = 300\text{K}$) максимум випромінювання тіл припадає на інфрачервону область, тобто лежить поза видимим діапазоном. У міру нагрівання максимум зміщується у видиму область (рис 14.1). Середина видимої частини спектра Сонця ($\lambda_{\max} = 577\text{nm}$) відповідає температурі $T = 5000\text{K}$, отже, тисячам градусів.

Закон Стефана-Больцмана. Інтегральна енергетична світимість абсолютно чорного тіла R пропорційна четвертому ступеню абсолютної температури:

$$R = \sigma \cdot T^4, \quad (14.6)$$

де σ – стала Стефана – Больцмана.

На рисунку 14.1 інтегральна енергетична світимість відповідає площі під кривою $r_{\lambda}(\lambda)$.

Виконання роботи

Мета роботи – експериментально визначити сталу Стефана-Больцмана (σ).

Опис установки

Для обчислення σ за допомогою формули (14.6) необхідно знати випромінювальну здатність R і температуру T нагрітого тіла, у якості якого використовується вольфрамова пластинка, що нагрівається до високих температур при пропусканні через неї електричного струму. Тоді за законом Джоуля-Ленца кількість тепла, що виділилося в ній, буде дорівнювати

$$Q = IUt, \quad (14.7)$$

де U – напруга на пластинці, I – струм через пластинку, t – час.

Це тепло буде випромінюватися вольфрамовою пластинкою. *Енергетична світимість* – кількість енергії, що випромінюється одиницею поверхні в одиницю часу, дорівнює:

$$R = \frac{IU}{S}, \quad (14.8)$$

де S – площа пластинки.

Температура пластинки занадто велика, щоб її можна було вимірювати, приводячи в тепловий контакт із рідинним термометром або термопарою. Тому для виміру T використовують оптичний пірометр.

Його застосування засноване на припущенні, що якщо яскравості двох тіл (вимірюваного й еталонного) рівні, тоді рівні і їхні температури. Пірометр містить еталонну нитку розжарювання, температуру і яскравість якої можна змінювати, регулюючи струм I_0 , що протікає через неї. В окуляр пірометра можна спостерігати вольфрамову пластинку, що світиться, і на її тлі – еталонну нитку (рис. 14.3). Змінюючи струм через нитку, домагаються такого його значення, щоб яскравості зразка й еталона збіглися (у цей момент нитка «зникає» на тлі пластинки), при цьому й температури збігаються. Температуру еталона (нитки) визначають за градуїровкою пірометра, вимірюючи струм I_0 амперметром.

Однак, оскільки вольфрамова пластинка не є абсолютно чорним тілом, виміряна за порівнянням яскравостей температура, буде для неї не абсолютною, а так званою, яскравісною T^* , пов'язаною із істиною

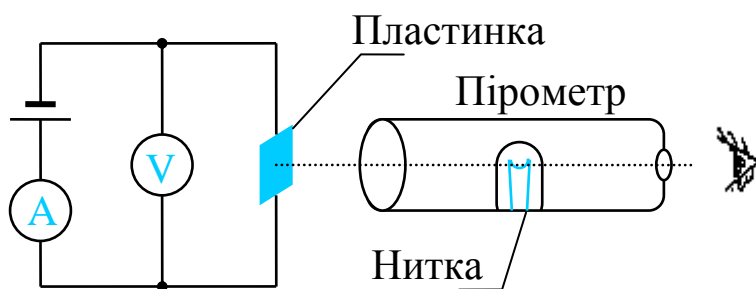


Рис. 14.2

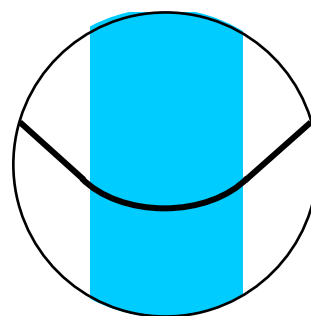


Рис. 14.3

формулою

$$T = \frac{T^*}{1 + \frac{k\lambda}{2\pi\hbar c} \ln a_\lambda} . \quad (14.9)$$

З урахуванням навколишньої (кімнатної) температури T_K формула для розрахунку σ (14.6) буде виглядати таким чином:

$$R = \sigma(T^4 - T_K^4) . \quad (14.10)$$

Підставляючи в (14.10) значення R і T , визначені за (14.8) і (14.9) відповідно, і, вимірявши кімнатну температуру T_K , знаходять сталу Стефана-Больцмана.

Хід роботи

1. Ознайомитися з вимірювальною установкою. Визначити температуру в кімнаті T_K . Підготувати таблицю для запису даних вимірів.

2. Включити живлення в ланцюзі вольфрамової пластинки. Виміряти струм I через неї і напругу U .

3. Включити струм I_0 через еталонну нитку накаливання й за допомогою окуляра домогтися чіткого її зображення на тлі пластинки.

4. Регулюючи реостатом пірометра струм I_0 через еталонну нитку, домогтися її зникнення на тлі вольфрамової пластинки. Записати відповідне значення струму I_0 .

5. За градувальним графіком пірометра, знаючи значення струму I_0 , визначити яскравісну температуру T^* .

6. За формулою (14.9) розрахувати істинну температуру пластинки, а за формулою (14.8) її випромінювальну здатність.

7. За допомогою формули (14.10) визначить сталу Стефана-Больцмана.

Контрольні питання

1. Що являє собою електромагнітна хвиля? Назвіть основні характеристики хвиль.

2. Що називають радіаційним теплообміном?

3. Дайте визначення випромінювальній і поглинальній здатності.

4. Яке тіло називається абсолютно чорним? Сформулюйте закони випромінювання абсолютно чорного тіла.

5. Що таке кванти? Чому дорівнює енергія кванта? Запишіть та поясніть формулу Планка.

6. Оптична пірометрія. Що вимірюють пірометром?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №15 **ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИН ХВИЛЬ СПЕКТРАЛЬНИХ ЛІНІЙ.** **ЯКІСНИЙ СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ**

Світло – електромагнітні хвилі оптичного діапазону – випромінюють атоми, молекули або іони джерела світла. *Спектром називається сукупність хвиль, що випромінюються.* Кожна хвиля має свою довжину, і якщо вона відноситься до видимого діапазону, око людини сприймає її як відповідний колір.

Суцільні спектри дають усі тіла згідно з законами теплового випромінювання. Лінійчасті спектри зумовлені електронними переходами, які переводять атоми зі стану з високою енергією (збуджений стан) в основний стан. При кожному такому переході надлишок енергії випромінюється в вигляді кванта світла з конкретною довжиною хвилі, яка залежить від енергії станів, між якими відбувається спектральний перехід (другий постулат Бора). Таким чином, лінійчасті спектри дають можливість визначати структуру енергетичних станів (рівнів) атомів.

Оскільки атоми кожного хімічного елемента мають структуру енергетичних рівнів, що відрізняється від інших, спостерігаючи спектри сплавів (або сумішей), можна виявити присутність навіть дуже незначної кількості даного елемента. В цьому і полягає *якісний спектральний аналіз*. Кількісний спектральний аналіз можна проводити на основі інтенсивності спектральних ліній даного елемента.

Для того, щоб отримати спектр речовини і дослідити його, потрібно:

по-перше примусити її атоми випромінювати світло, тобто перевести їх у збуджений стан, що робиться або нагрівом, або створенням електричного розряду в парах речовини (електрична дуга);

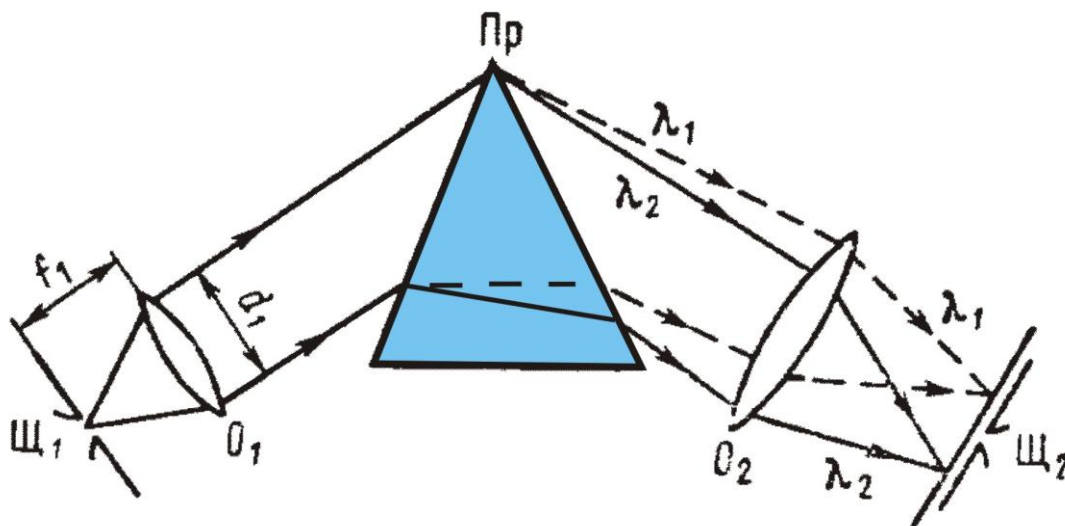
по-друге просторово розділити хвилі, що випромінюються, за допомогою спектрального приладу (монохроматор, спектроскоп, спектрометр та ін.).

Виконання роботи

Мета роботи – визначити довжини хвиль спектральних ліній міді за допомогою стилоскопа та провести спектральний аналіз латуні на наявність цинку.

Опис установки

Стилоскоп – спектральний прилад (варіант спектроскопа), який дозволяє розкласти випромінювання в спектр і виконувати якісний і



напівкількісний аналіз сплавів. Принципова оптична схема його наведена на рисунку 15.1. Джерелом світла є електрична дуга, яка утворюється між двома електродами – мідним і зробленим із досліджуваного металу або сплаву. Світло від неї проектується на вхідну щілину стилоскопу Щ, після чого розкладається в спектр скляною призмою. Компоненти спектра спостерігаються через окуляр Щ. Для визначення довжини хвилі стилоскоп має шкалу, нанесену на гвинт (барабан), за допомогою якого обертається призма і відповідна спектральна лінія з'являється в полі зору в окулярі. Відлік поділок шкали барабана потрібно робити, сполучивши лінію з вістрям вказівника, розташованого внизу поля зору окуляра.

Для того, щоб отримати значення довжини хвилі в метрах або в ангстремах ($1 \text{ ангстрем} = 10^{-10} \text{ м}$), які частіше використовуються в спектроскопії, шкалу стилоскопа потрібно проградувати, тобто поставити поділкам шкали у відповідність значення їх в ангстремах. Для градуювання потрібен еталон, в якості якого в даній роботі використовують випромінювання ртуті з відомими довжинами хвиль.

Призма розкладає випромінювання в спектр завдяки явищу дисперсії світла – залежності показника заломлення n речовини (в

даному випадку – скла) від довжини хвилі. Навіть якщо усі компоненти світла падають на призму під одним кутом, кожній з них завдяки дисперсії буде відповідати свій показник заломлення, а значить і свій кут заломлення (рис. 15.1), що впливає із закону заломлення. Оскільки призма на відміну від пласкої скляної пластини має заломлюючий кут, при виході з призми хвилі різної довжини виявляються просторово поділеними. Більші кути заломлення мають сині та фіолетові хвилі, менші – червоні.

Хід роботи

1. Проградувати стилоскоп. В якості еталона використати ртутну лампу. Випромінювання ртуті спрямувати на вхідну щілину, спостерігати в окуляр лінійчастий спектр ртуті в жовто-фіолетовому діапазоні (довжини хвиль в ангстремах: 5791 і 5770 – жовтий дублет; 5460 – зелена; 4358 – синя; 4077 і 4046 – фіолетові). Поворотом барабана почергово підводити, починаючи із жовтих, спектральні лінії до вказівника в окулярі і записувати відповідну поділку шкали барабана. За отриманими даними побудувати градувальний графік λ (n).

2. Визначити довжини спектральних ліній міді. Для цього ввімкнути електричну дугу з двох мідних електродів. Спостерігаючи спектр міді в окуляр стилоскопа, визначити відповідні поділки шкали барабана аналогічно до п.1. Користуючись градувальним графіком, визначити за вибором довжини хвиль яскравих ліній міді.

3. Провести спектральний аналіз латуні на наявність цинку. Латунь – мідний сплав з домішками цинку. Один з електродів дуги замінити на латунний, порівняти спектри міді та латуні в області 430-500нм. Виділити характерний для цинку триплет ліній з довжинами 467, 472, 480нм.

Контрольні питання

1. Дайте визначення суцільним і лінійчастим спектрам випромінювання.
2. Яким чином і з якою метою проводять спектральний аналіз? За якими параметрами спектру проводять якісний і кількісний аналіз?
3. Опишіть принципову оптичну схему монохроматора.
4. Поясніть, завдяки чому за допомогою призми можна отримати спектр? Зобразіть хід променя через призму.
5. За допомогою чого градуують спектральні прилади?

Література

1. Савельев И.В. Курс физики :Учеб. : В 3-х т. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.
2. Лабораторные занятия по физике : Учеб. пособие. / Под ред. Гольдина Л.Л. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. – 704 с.
3. Лабораторный практикум по физике: Учеб. пособие для студентов втузов. / Под ред. Ахматова А.С. – М. : Высшая школа, 1980. – 360 с.
4. Лабораторный практикум по физике : Учеб.пособие для студентов втузов. / Под ред. Барсукова К.А. и Уханова Ю.И. – М. : Высшая школа, 1988. – 351 с.
5. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике : Учеб. пособие. – 4-е изд. – М. : Высшая школа, 1981. – 496 с.
6. Физика : Методические указания и контрольные задания для студентов-заочников / Сост. : А.Г. Андерс, В.Г. Борисенко, Е.М. Савченко, И.А. Таранова. – Харьков : ХНУ. – 2006. – 88 с.

ДОДАТКИ

Похибки вимірів*

Всі виміри характеризуються похибками. Якщо фізична величина визначається безпосередньо за допомогою відповідного приладу – такі виміри називаються *прямими*, якщо величина визначається розрахунком за відповідною формулою – виміри називаються *непрямими*.

Істинним значенням деякої величини X прийнято вважати *середнє арифметичне значення* цієї величини

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}.$$

Абсолютні похибки окремих вимірів

$$|\langle x \rangle - x_n| = \Delta x_n.$$

Абсолютна похибка виміру величини X у цілому дорівнює

$$\Delta x = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n}{n}.$$

Результат вимірів записують у вигляді:

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x, \text{ одиниці вимірювання.}$$

Відносна похибка виміру δx – відношення абсолютної похибки до істинного значення величини, що вимірюється, виражається в % або в частках

$$\delta x = \frac{|\Delta x|}{x_{\text{істинн}}}$$

При непрямих вимірах величин значення фізичної величини F обчислюється за формулою

$$F = F(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – фізичні величини, що безпосередньо виміряні.

Абсолютна похибка ΔF непрямих вимірів визначається за формулою

* Матеріали підрозділу подано за джерелом [5].

$$\Delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1} |\Delta x_1|\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} |\Delta x_2|\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_n} |\Delta x_n|\right)^2},$$

де $\frac{\partial F}{\partial x_n}$ – часткові похідні функції F за змінною x_n ;

Δx_n – абсолютні похибки виміру величини x_n .

Для відносної похибки

$$\delta F = \frac{\Delta F}{\langle F \rangle}.$$

Відносну похибку при непрямих вимірах, якщо розрахункова формула зручна для логарифмування, розраховують спочатку логарифмуючи, а потім диференціюючи отриманий вираз.

Результат непрямого виміру також представляють у вигляді

$$F = \langle F \rangle \pm \Delta F, \text{ одиниці вимірювання.}$$

Округлення результатів вимірів

Значущими цифрами прийнято називати всі цифри 1,2,3,...9, а також нуль, але тільки в тих випадках, якщо він знаходиться в середині або наприкінці числа, але не на початку. Наприклад, числа 0,17; 0,017; 0,0017 мають дві значущі цифри. Число 1,38044 має шість значущих цифр.

1. *Результат вимірів потрібно округлити так, щоб цифри, що залишилися, закінчувалися тим самим розрядом, що й значення його похибки або, щоб число знаків після коми в результаті збігалось з*

числом знаків після коми у похибці. Кількість знаків після коми в обмірюваній величині та похибці повинно збігатися, наприклад:

$$h = (2,75 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}, \text{ м}.$$

2. Якщо цифра першого з розрядів, що відкидаються, менша 5, то цифри, що залишаються, не змінюються. Зайві цифри в цілих числах заміняють нулями, а в десяткових дробах відкидають. Наприклад, числове значення результату виміру 65,5432 при похибці в межах $\pm 0,04$ варто округлити до 65,54. Число 265245 при збереженні чотирьох значущих цифр повинно бути округлене до 265200, а число 265,245 – до 265,2.

3. Якщо цифра старшого з розрядів, що відкидаються, більше або дорівнює п'яти, але перед нею впливають відмінні від нуля цифри, то останню цифру що залишається, збільшують на одиницю. Наприклад, при збереженні трьох значущих цифр, число 12582 округляють до 12600, а число 125,82 – до 126.

Приклад

Розглянемо такий приклад. Нехай потрібно визначити густину речовини, маса й об'єм якої дорівнюють відповідно

$$m = 9,38 \pm 0,01 \text{ г}$$

$$V = 3,46 \pm 0,01 \text{ см}^3$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{9,38}{3,46} = 2,71098 \text{ г/см}^3.$$

Але числа 9,38 і 3,46 – наближені, тобто останні цифри (8 і 6) в цих числах сумнівні (мають похибку). Тоді в розглянутому прикладі обчислення густини необхідно вести до другого десяткового знака (округлити до сотих), а потім виразити густину в системі СІ

$$\rho = 2,71 \text{ г/см}^3 = 2710 \text{ кг/м}^3.$$

Наближені обчислення варто вести з дотриманням наступних правил.

1. При додаванні та відніманні остаточний результат округляють так, щоб він не мав значущих цифр у тих розрядах, які відсутні хоча б в одному з наближених даних. Приклад:

$$4,462 + 2,38 + 1,17273 + 1,0262 = 9,04093.$$

Суму варто округлити до сотих часток, тобто прийняти її рівною 9,04.

2. При множенні округляти так, щоб кожний зі співмножників містив стільки значущих цифр, скільки їх має співмножник з найменшим числом таких цифр. Приклад:

$$\text{замість } 3,723 \cdot 2,4 \cdot 5,1846$$

обчислюють $3,7 \cdot 2,4 \cdot 5,2$.

В остаточному результаті 46,176 залишають таке число значущих цифр, що є у співмножниках після їхнього округлення, тобто 46,2.

3. При зведенні у квадрат або куб треба в ступені брати стільки значущих цифр, скільки їх є у підставі ступеня. Приклад:

$$1,32^2 = 1,74.$$

4. При витягу квадратного або кубічного кореня в результаті потрібно брати стільки значущих цифр, скільки їх є у підкореневому виразі, наприклад:

$$\sqrt{1,17} = 1,08.$$

5. При обчисленні складних виразів варто застосовувати зазначені правила відповідно до окремих дій. Приклад:

$$\frac{(3,2 + 17,062)}{5,4 \cdot 2,007} = 1,9.$$

Похибки табличних величин і одиничних вимірів

1. В якості абсолютної похибки табличної величини приймається п'ять одиниць розряду, що міститься за останньою значущою цифрою.

Наприклад, якщо $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$, то $\Delta\rho = \pm 0,05 \text{ г/см}^3$; якщо $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, то $\Delta g = \pm 0,005 \text{ м/с}^2$.

2. Якщо в розрахункову формулу входять константи, наприклад, $e=2,718\dots$, $\sqrt{2} = 1,41\dots$, то за похибку приймається округлене значення частини числа, що відкидається.

3. За абсолютну похибку при поодиноких вимірах можна приймати половину ціни найменшої поділки приладу. Наприклад, якщо ціна поділки лінійки 1мм, то абсолютну похибку треба брати 0,5 мм.

Основні одиниці SI

Метр (1м) – одиниця довжини – дорівнює 1 650 763,73 довжини хвилі у вакуумі випромінювання, яке відповідає переходу між рівнями $2p_{10}$ і $5d_5$ атома криптону-86.

Кілограм (1 кг) – одиниця маси – дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма.

Секунда (1 с) – одиниця часу – дорівнює 9 192 631 770 періодам випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію – 133.

Кельвін (1K) – одиниця термодинамічної температури – дорівнює $1/273,16$ частини термодинамічної температури потрійної точки води.

Моль (1 моль) – одиниця кількості речовини – дорівнює кількості речовини системи, яка містить стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці-12 масою 0,012 кг.

Ампер (1A) – одиниця сили струму – дорівнює силі незмінного струму, який при протіканні по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини та дуже малої площі поперечного перерізу, розміщених у вакуумі на відстані 1 м один від одного, спричинив би виникнення на ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$.

Кандела (1кд) – одиниця сили світла – дорівнює силі світла, що випромінюється з поверхні площею $1/600000 \text{ м}^2$ повного випромінювача у перпендикулярному напрямі при температурі випромінювача, яка дорівнює температурі тверднення платини при тиску 101 525 Па.

Грецький алфавіт

Α α	– альфа	Ν ν	– ню
Β β	– бета	Ξ ξ	– ксі
Γ γ	– гама	Ο ο	– омікрон
Δ δ	– дельта	Π π	– пі
Ε ε	– епсилон	Ρ ρ	– ро
Ζ ζ	– зета	Σ σ	– сигма
Η η	– ета	Τ τ	– тау
Θ θ	– тета	Υ υ	– іпсилон
Ι ι	– йота	Φ φ	– фі
Κ κ	– капа	Χ χ	– хі
Λ λ	– лямбда	Ψ ψ	– псі
Μ μ	– мю	Ω ω	– омега

Деякі похідні одиниці СІ

Фізична величина	Позначення одиниці
Швидкість	м/с
Прискорення	м/с ²

Кутова швидкість	рад/с
Кутове прискорення	рад/с ²
Частота	герц, Гц = с ⁻¹
Площа	м ²
Об'єм	м ³
Густина	кг/м ³
Сила, вага	ньютон, Н = кг·м/с ²
Тиск	паскаль, Па = Н/м ²
Робота, енергія, кількість теплоти	джоуль, Дж = Н·м
Потужність	ват, Вт=Дж/с
Питома теплота	Дж/кг
Теплоємність	Дж/К
Питома теплоємність	Дж/(кг·К)
Кількість електрики, заряд	кулон, Кл = А·с
Напруженість електричного поля	Н/Кл = В/м
Електрична напруга, потенціал, ЕРС	вольт, В =Дж/Кл =Вт/А
Електрична ємність	фарада, Ф = Кл/В
Електричний опір	ом, Ом = В/А
Електрична провідність	сіменс, См = 1/Ом
Магнітна індукція	тесла, Тл =Н/(А·м)
Магнітний потік	вебер, Вб = Тл·м ² = В·с
Індуктивність	генрі, Г = В·с/А = Вб/А
Світловий потік	люмен, лм = кд·ср
Освітленість	люкс, лк = лм/м ²
Оптична сила лінзи	діоптрія, дптр = 1/м

Деякі астрономічні величини

Середній радіус Землі	6,37·10 ⁶ м
Маса Землі	5,98·10 ²⁴ кг
Радіус Сонця	6,96·10 ⁶ м

Маса Сонця	$1,99 \cdot 10^{30}$ кг
Радіус Місяця	$1,74 \cdot 10^6$ м
Середня відстань між центрами Землі та Місяця	$3,84 \cdot 10^8$ м
Середня відстань між центрами Землі та Сонця	$1,50 \cdot 10^{11}$ м

Основні фізичні константи

Швидкість світла у вакуумі, c	$2,998 \cdot 10^8$ м/с
Гравітаційна стала, G	$6,672 \cdot 10^{-11}$ Нм ² /кг
Стала Авогадро, N_A	$6,022 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Стандартний об'єм газу, V_M	$2,241 \cdot 10^{-2}$ м ³ /моль
Молярна газова стала, R	8,314 Дж/моль·К
Стала Больцмана, k	$1,381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Елементарний заряд, e	$1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл
Питомий заряд електрона, e/m_e	$1,759 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Електрична стала, ϵ_0	$8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Стала Фарадея, F	$9,648 \cdot 10^4$ Кл/моль
Магнітна стала, μ_0	$1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м
Стала Планка, h	$6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Атомна одиниця маси (а. о. м.)	$1,6605655 \cdot 10^{-27}$ кг
Маса спокою електрона, m_e	$9,109534 \cdot 10^{-31}$ кг
Маса спокою протона, m_p	$1,6726485 \cdot 10^{-27}$ кг
Маса спокою нейтрона, m_n	$1,6749543 \cdot 10^{-27}$ кг

Література

1. Савельев И.В. Курс физики :Учеб. : В 3-х т. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: Учебное пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1999. – 542с.:ил.
3. Кучерук І.М. та ін. Загальний курс фізики: Навч.посібник для студентів вищих техн. і пед. закладів освіти. – К.:Техніка,1999.
- 4.Палехін В.П. Фізика:Підручник. – Х.: ХНУ імені В.Н.Каразіна,2009. - 396с.
- 5.Чолпан П.П.Фізика:Підручник. – К.:Вища шк.,2004. – 567с.: іл.
6. Лабораторные занятия по физике : Учеб. пособие. / Под ред. Гольдина Л.Л. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. – 704 с.
7. Лабораторный практикум по физике: Учеб. пособие для студентов втузов. / Под ред. Ахматова А.С. – М. : Высшая школа, 1980. – 360 с.
8. Лабораторный практикум по физике : Учеб.пособие для студентов втузов. / Под ред. Барсукова К.А. и Уханова Ю.И. – М. : Высшая школа, 1988. – 351 с.
9. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике : Учеб. пособие. – 4-е изд. – М. : Высшая школа, 1981. – 496 с.
10. Физика : Методические указания и контрольные задания для студентов-заочников / Сост.: А.Г.Андерс, В.Г.Борисенко, Е.М. Савченко, И.А. Таранова. – Харьков : ХНУ. – 2006. – 88 с.